



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA

**USO EFICIENTE DE AGUA, DESARROLLO DEL CULTIVO Y
ESTRÉS HÍDRICO EN TRIGO (*Triticum durum* L.) CON RIEGO
AFECTADO POR PRÁCTICAS DE MANEJO**

**TITULACIÓN POR TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

INGENIERO BIOTECNOLOGO

PRESENTA

Jesus Enrique Mendoza Lugo

CD. OBREGÓN, SONORA

FEBRERO DE 2010

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quisiera agradecer al Dr. Bram Govaerts por su invaluable asesoría y por darme la oportunidad de realizar este trabajo de investigación con los recursos de CIMMYT.

Quiero agradecer especialmente a Nele Verhulst por ayudarme con mi trabajo de tesis, leer mis avances y hacer importantes correcciones. Ser un soporte muy importante en los momentos en que no tenía claras las cosas.

Agradezco también la asistencia técnica, el apoyo y la invaluable amistad y compañerismo de Manuel Ruiz Cano (Mangüe), Jesús Gutiérrez Angulo (Churris), Juan de Dios Sánchez López (Yakas), Alvaro Zermeño (Parkay), Cristobal Rascón (Chito), Beatriz Martínez Ortiz (Betty). Gracias por enseñarme como trabajar en el campo y sobre todo por tenerme paciencia al hacerlo. Este trabajo simplemente no hubiera sido posible sin la ayuda de todos ustedes!

Para concluir quiero agradecer a mi Familia, Rosa Amelia Lugo Ruiz, José Pedro Mendoza Domínguez y José Alberto Mendoza Lugo a quienes dedico mi trabajo de Tesis. A mis amigos gracias por su gran apoyo!

RESUMEN

Este estudio fue hecho en el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT, int) para investigar el impacto de la Agricultura de conservación en el contenido del agua en el suelo fin de optimizar su uso en los sistemas agrícolas, así como determinar la influencia del manejo de labranza y residuos sobre el desarrollo del cultivo y la erosión del suelo causada por el agua de riego. Los experimentos se encuentran en la estación de investigación Centro de Investigaciones Agrícolas del Noroeste (CIANO), en el Valle del Yaqui cerca de Ciudad Obregón, Estado de Sonora, México (Lat. 27.29° N, Lon.109.55° W, 38 m snm). La temperatura anual promedio es de 24.9 °C (1981–2000) y el promedio anual de lluvia es 384.1 mm. El tipo de suelo en la estación del CIANO es una arcilla arenosa común, Chromic Haplotorrert (Hyposodic Vertisol (Calcaric, Chromic)), bajo en materia orgánica (<1%) y ligeramente alcalino (pH 7.7). El trabajo está dividido en dos ensayos: un ensayo de sustentabilidad a largo plazo y un ensayo para evaluar la resistencia a los efectos del cambio climático. Los tratamientos en el ensayo de sustentabilidad a largo plazo consisten de camas con labranza convencional incorporando los residuos y camas permanentes con cuatro manejos diferentes de paja (quemada, removida, parcialmente removida y retenida en la superficie). El ensayo para evaluar la resistencia a los efectos del cambio

climático está dividido en dos ambientes (riego normal y riego reducido) y los tratamientos constan de camas de labranza convencional con incorporación de residuos y camas permanentes con rastrojo removido y rastrojo retenido. Para evaluar la eficiencia en el uso de agua se hicieron mediciones de humedad en el suelo (0-60 cm), antes y después de cada riego periódicamente. La evaluación del desarrollo del cultivo se realizó por medio un sensor de Índice diferencial normalizado de vegetación (NDVI) y por medio de la cobertura del suelo por follaje. Se realizó la estimación de la erosión del suelo causada por el agua de riego como la concentración de suelo en el agua de riego de salida cada parcela experimental. En el ensayo de sustentabilidad a largo plazo las camas permanentes con rastrojo retenido en la superficie muestran mayor contenido de humedad comparado con las camas permanentes con cualquier otro manejo de residuos cuando el cultivo es manejado sin nitrógeno. En los sistemas de manejo con camas permanentes donde no se quema el rastrojo el desarrollo es más rápido al inicio comparado con camas convencionales cuando no se fertiliza el cultivo. El factor limitante del nitrógeno hace que sean más marcadas las diferencias entre los diferentes sistemas. Existe una mayor susceptibilidad del sistema convencional a la erosión causada por el agua de riego. En el ensayo para evaluar la resistencia a los efectos del cambio climático, bajo el sistema de camas permanentes con retención de (parte de) los residuos hay mas humedad de suelo y esto se ve reflejado en el desarrollo del cultivo. La implementación de agricultura de conservación con camas permanentes y retención de (parte de) los residuos resulta en un sistema que es más resistente a condiciones de sequía que el sistema convencional que incluye labranza. La agricultura de conservación puede ser una alternativa sustentable para el agricultor.

INDICE

INDICE DE FIGURAS	vii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación.....	3
1.2 Planteamiento del problema.	4
1.3 Objetivos.	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos específicos.	6
1.4 Hipótesis.	6
II. REVISION DE LITERATURA	8
2.1 Agricultura de conservación.....	8
2.2 Agricultura de conservación bajo condiciones de riego.	10

2.3 Erosión hídrica del suelo.....	12
2.4 Desarrollo del cultivo.....	13
2.5 Estrés hídrico (Sequia).....	14
III. MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.1 Caracterización de los experimentos de campo.	16
3.2 El ensayo de sustentabilidad a largo plazo.....	17
3.3 El ensayo para evaluar la resistencia a los efectos del cambio climático . . .	22
3.4 Parámetros de medición del suelo.....	27
3.4.1 Erosión hídrica del suelo.....	27
3.4.2 Contenido de humedad del suelo.	28
3.5 Desarrollo del cultivo durante el ciclo de cultivo.....	29
3.5.1 Diferencia Normalizada del Índice Vegetativo (NDVI).....	30
3.5.2 Cobertura del suelo por el follaje.	31
IV. RESULTADOS Y DISCUSION	33
4.1 Ensayo de sustentabilidad a largo plazo.....	33
4.1.1 Parámetros de medición del suelo.....	33
4.1.2 Desarrollo del cultivo durante el ciclo de cultivo.	42
4.2 Ensayo para evaluar la resistencia a los efectos del cambio climático	52
4.2.1 Parámetros de medición de suelo.....	52
4.2.2 Desarrollo del cultivo durante el ciclo de cultivo	58

V. CONCLUSIONES	67
5.1 Ensayo de sustentabilidad a largo plazo.....	67
5.2 Ensayo para evaluar la resistencia a los efectos del cambio climático	69
VI. LITERATURA CITADA.....	71

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ensayo de sustentabilidad a largo plazo.	20
Figura 2. Mapa del ensayo para evaluar el cambio climático.....	25
Figura 3. Erosion hidrica del suelo durante los riegos.....	34
Figura 4. Contenido de humedad de suelo en el perfil de 0 a 60 cm con 0 N de fertilización	36
Figura 5. Contenido de humedad de suelo en el perfil de 0 a 60 cm en los tratamientos con fertilización de 150 kg de N/ha.....	38
Figura 6. Contenido de humedad de suelo en el perfil de 0 a 60 cm en los tratamientos con fertilización de 300 kg de N/ha.....	38

Figura 7. Contenido de humedad en el perfil de 15 a 30 cm en los tratamientos con 0 N de fertilización.....	40
Figura 8. Contenido de humedad en el perfil de 30 a 45 cm en los tratamientos con 0 kg de N/ha.	41
Figura 9. Contenido de humedad en el perfil de 0 a 15 cm en los tratamientos con 150 kg de N/ha.	42
Figura 10. NDVI en los tratamientos con fertilización de 0 N.	44
Figura 11. en los tratamientos con fertilización de 150 kg de N/ha.	45
Figura 12. NDVI en los tratamientos con fertilización de 300 kg de N/ha.....	47
Figura 13. Cobertura del suelo por el follaje en los tratamientos con fertilización de 0 kg de N/ha.	49
Figura 14. Cobertura del suelo por el follaje en los tratamientos con fertilización de 150 kg de N/ha.	50
Figura 15. Cobertura del suelo por el follaje en los tratamientos con fertilización de 300 kg de N/ha.	51
Figura 16. Contenido de humedad en el perfil de 0 a 60 cm en los tratamientos con 0 Nitrógeno bajo riego normal y riego reducido (sequía).	53
Figura 17. Contenido de humedad en el perfil de 0 a 60 cm en los tratamientos con fertilización de 76 kg N/ha antes del riego de presembrado y 38 kg N/ha en el estado de primer nudo bajo riego normal y riego reducido (sequía)	54
Figura 18. Contenido de humedad en el perfil de 0 a 60 cm en los tratamientos con fertilización de 152 kg N/ha basal y 76 kg N/ha en el estado de 1er nudo bajo riego normal y riego reducido (sequía).	56

Figura 19. NDVI en los tratamientos con 0 nitrógeno bajo riego normal y riego reducido (sequía)	60
Figura 20. NDVI en los tratamientos con fertilización de 76 kg N/ha antes del riego de presembrado y 38 kg N/ha en el estado de primer nudo bajo riego normal y riego reducido (sequía)	61
Figura 21. NDVI en los tratamientos con fertilización de 152 kg N/ha antes del riego de presembrado y 76 kg N/ha en el estado de primer nudo bajo riego normal y riego reducido (sequía)	63
Figura 22. Cobertura del follaje en los tratamientos con fertilización de 76 kg N/ha antes del riego de presembrado y 38 kg N/ha en el estado de primer nudo bajo riego normal y riego reducido (sequía).....	66

I. INTRODUCCIÓN

Esta investigación es parte de los esfuerzos del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) para desarrollar y evaluar sistemas de producción de Agricultura de Conservación (AC) como alternativa para la producción sustentable en zonas agro-ecológicas semiáridas.

En todo el mundo, el empleo del agua y su gestión han sido un factor esencial para elevar la productividad de la agricultura y asegurar una producción previsible. (FAO, 2002b). En la producción agrícola en zonas áridas y semiáridas el riego es la fuente más importante de agua para las plantas, por lo que los problemas de su escasez conllevan al uso más eficiente de la misma (Díaz et al., 2008). Más del 50% de la producción de trigo en los países en desarrollo proviene de condiciones de riego, y la gran mayoría de los agricultores participantes son agricultores a pequeña escala (Byerlee y Moya, 1993). México ha sido uno de los países afectados por escasez de agua y la superficie bajo riego del país es de aproximadamente 6.46 millones de ha, siendo uno de los países con mayor superficie agrícola bajo riego en el mundo (Sánchez, 2009). La agricultura es el

sector que consume más agua, representando globalmente alrededor del 69% por ciento de toda la extracción (Benites y Castellanos, 2003). En Sonora se encuentra aproximadamente 11% de la superficie abajo riego de todo México (FAO, 2000). Especialmente el Valle de Yaqui donde se siembra aproximadamente 255,000 ha de superficie bajo riego usando principalmente sistemas de riego de gravedad alimentado por canales (siendo las fuentes de aprovechamiento de agua 80% de escurrimiento superficial y 20% de pozos profundos) (INIFAP, 2001). Por lo tanto, el desarrollo sustentable de la agricultura como un objetivo deseado en el manejo del riego es un resultado de la reciente conciencia social por la escasez de agua para la producción de alimentos (Manoliadis, 2001). Por otra parte el cambio climático a largo plazo, en particular el calentamiento del planeta, podría afectar a la agricultura en diversas formas, y casi todas son un riesgo para la seguridad alimentaria de las personas más vulnerables del mundo (FAO, 1997). Hay una clara necesidad de desarrollar tecnologías de Agricultura de Conservación (AC) apropiadas para condiciones de riego de superficie y su adopción por agricultores a pequeña escala. Sin embargo, la adopción de esta tecnología ha ocurrido principalmente en los agricultores a gran escala y casi universalmente por sistemas de producción de temporal (Sayre y Hobbs, 2004). Una de las principales dificultades para reducir la labranza y la retención de los residuos para zonas bajo sistemas de riego, está ligada al uso extensivo de siembra en melgas en plano combinada con sistemas de riego por inundación y riego por compartimientos que son comúnmente usadas a nivel mundial.

Para buscar respuesta a estas necesidades, en el Campo Experimental de CIMMYT ubicado en Ciudad Obregón, Sonora, México; en 1992 se estableció un experimento a largo plazo donde se pretenden evaluar diferentes sistemas de labranza de conservación bajo condiciones de riego y en 2006 un ensayo para

evaluar la resistencia a los efectos del cambio climático. Este proyecto investiga el siguiente paso lógico para incrementar la sostenibilidad de las camas y hacerlas permanentes, reducir o evitar la labranza y retener y distribuir los residuos en la superficie, reformar las camas solo cuando sea necesario (se denomina a dichas camas como camas permanentes).

1.1 Justificación.

Este proyecto investiga el impacto de la agricultura de conservación en el balance de agua en el suelo y la eficiencia del uso de agua en los cultivos a fin de optimizar el su uso en los sistemas agrícolas.

Con los resultados que se obtengan de esta investigación se contribuirá a disminuir el consumo agua en el riego, recurso que cada día se es más escaso; además ayudara a los agricultores de los países en vías de desarrollo a disminuir los costos de producción en el campo, obtener más utilidades y contribuir al mismo tiempo a disminuir la emisión de contaminantes al medio ambiente; causado por el uso excesivo de maquinaria agrícola.

1.2 Planteamiento del problema.

El agua es uno de los recursos naturales más importantes de nuestro planeta. La creciente escasez de este recurso hace que sea necesario un nuevo planteamiento de los sistemas agrícolas para buscar métodos mejores del manejo del agua, cómo única opción para mejorar la seguridad alimentaria mundial (FAO, 2003). Los estudios del efecto de la rotación de cultivos, sistemas de labranza y manejo de los residuos sobre el balance de agua en el suelo y la eficiencia del uso de agua para riego son escasos. Unos cuantos estudios han comparado las rotaciones algodón-trigo y labranza mínima con siembra continua de algodón y labranza convencional y encontraron que las rotaciones de trigo y la labranza mínima mejoraron significativamente el uso de agua y el nivel de extracción de agua (Hulugalle y Entwistle, 1997b; Hulugalle et al., 1997a), el uso eficiente de agua en algunos años y su aplicación eficiente en todos los años (Tennakoon y Hulugalle, 2006).

Un problema importante, pero poco tomado en cuenta, es la erosión del suelo de cultivo causada por el aire y el agua de riego. Con la agricultura o labranza convencional el arado remueve varias veces la capa superficial del suelo en cada ciclo de cultivo, el laboreo constituye por sí mismo la primera fase de la erosión, que consiste en el desprendimiento de las partículas de suelo; con esto, el suelo queda expuesto al efecto directo del viento y del agua (Betancourt, 2004).

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general

Esta investigación analiza diversos sistemas de producción, los cuales consisten en diferentes prácticas de labranza, manejo de residuos y niveles de fertilización de nitrógeno; así como; sus efectos sobre el cultivo y el suelo. El objetivo es determinar cuál de los sistemas de producción es el más eficiente con respecto al uso del agua. Se evaluará de igual manera la humedad del suelo y el desarrollo del cultivo en los diferentes sistemas de labranza, así como la respuesta del mismo a la reducción de agua disponible para el cultivo durante la fase de desarrollo.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Determinar en cuál de los sistemas hay una mayor erosión del suelo causada por el riego (Erosión hídrica)
- Evaluar la humedad del suelo a lo largo del ciclo de cultivo.
- Evaluar el efecto de los diferentes sistemas de producción sobre el desarrollo del cultivo utilizando el sensor NDVI (GreenSeeker).
- Determinar en cual sistema de producción, el cultivo se desarrolla mejor bajo la reducción del riego (condiciones de sequia)

1.4 Hipótesis.

El uso de sistemas con camas permanentes con el rastrojo retenido aumentará la disponibilidad del agua para el cultivo.

La erosión del suelo se manifestará aun más en los sistemas de labranza convencional que en los sistemas con camas permanentes con retención del rastrojo, debido a que en camas convencionales el suelo es removido, queda menos compactado y expuesto al arrastre por el agua.

El desarrollo del cultivo, será más lento al inicio de la temporada en camas permanentes con el rastrojo retenido que en camas convencionales y camas permanentes sin retención de rastrojo. Los cultivos con camas permanentes y retención de rastrojo mostrarán un comportamiento más estable, en condiciones de sequía que en las camas convencionales y camas permanentes sin retención de rastrojo, debido a una mayor disponibilidad de humedad y un mejor ambiente de crecimiento provocado por los residuos de los cultivos anteriores.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 Agricultura de conservación.

El paquete de prácticas agronómicas llamado 'Agricultura de Conservación' (AC) incluye la reducción ó eliminación de la labranza, retención de cantidades racionales de residuos de los cultivos en el campo y la práctica cada vez más adoptada de rotación de cultivos (CIMMYT, 2006; FAO, 2002a). La AC se basa en el fortalecimiento de procesos biológicos naturales encima y debajo de la superficie del suelo. Intervenciones como la labranza mecánica del suelo están reducidas, mientras que otros insumos de origen orgánico o sintético están usados

en su óptimo de una forma y cantidad que no interfiera o haga daño a los procesos biológicos (FAO, 2008).

La labranza mínima y labranza cero son un conjunto de técnicas utilizadas en AC, con el fin de mejorar y hacer sostenible la producción agrícola mediante la conservación y mejora de los suelos, el agua y los recursos biológicos (SICA, s.f.). En la técnica de la labranza mínima normalmente no se usa el arado, pero si se prepara la cama de siembra (Howard y Gómez, 2001). En la cero labranza se realiza siembra directa de un cultivo en los residuos de uno anterior, sin arar el suelo (CIMMYT, 2007). La labranza mínima y labranza cero son alternativas a la labranza convencional. La agricultura convencional se basa en la labranza del suelo como la operación principal, este proceso resulta en el largo plazo a una reducción de la materia orgánica del suelo (FAO, 2008); sin embargo la práctica de reducción ó eliminación de la labranza ha demostrado ser no sustentable sin retención de paja, por lo anterior un paquete moderno de cero labranza” siempre debería llevar retención de paja y rotación de cultivo (Ekboir, 2002).

En comparación con sistemas de labranza convencional, la AC presenta varias ventajas económicas, ecológicas y agronómicas (MMA, 2008). Entre las ventajas económicas, están principalmente un ahorro de combustible y trabajo (Brown, 1985). Se reduce la erosión de suelo, se disminuye el uso de combustible, que es tanto un beneficio económico, como ecológico. Entre las ventajas agronómicas, es principalmente el mejoramiento de las características del suelo: por su mayor concentración de nitrógeno mineralizable y carbono, conductividad eléctrica y porcentaje de sodio intercambiable (Dalal, 1989), mayor estabilidad de agregados (Limón-Ortega et al., 2006), mejora la infiltración (Hawkins et al., 2007), mayor disponibilidad de agua en el suelo (Govaerts et al., 2007a).

2.2 Agricultura de conservación bajo condiciones de riego.

La agricultura es el sector que consume más agua, representando globalmente alrededor del 69% por ciento de toda la extracción (Benites y Castellanos, 2003). El Valle del Yaqui cuenta con un total de 255, 000 ha de riego siendo una de las zonas agrícolas más importantes de México (INIFAP, 2001). Benites y Castellanos señalan que una gran parte del agua del mundo es malgastada sin control en riegos ineficaces, muchos con extracciones insostenibles de aguas subterráneas. Debido a la creciente escasez de este recurso es necesario un nuevo planteamiento de los sistemas agrícolas para buscar métodos mejores del manejo del agua (FAO, 2003).

En CIMMYT se trabaja para una mejor adaptación de la AC para productores de pequeña y mediana escala y también en agricultura en zonas de riego. Una de las principales dificultades para reducir la labranza y aumentar la retención de los residuos para riego de superficie, está ligada al uso extensivo de siembra en melgas en plano combinada con sistemas de riego por inundación. El riego por inundación conlleva a extremas dificultades en la distribución de agua de riego dentro del campo cuando los residuos se dejan sobre la superficie (Sayre y Hobbs, 2004). En el Valle del Yaqui en el noroeste de México, desde los pasados 25 años, más del 95% de los agricultores de la región han cambiado del uso de la

tecnología convencional de riego por inundación en plano a la tecnología de siembra en camas (Aquino, 1998). En esta una única hilera es sembrada en cada cama para cultivos como maíz ó soya y dos ó tres hileras se usan para trigo. Los agricultores que cultivan trigo en camas obtienen un 8% más de rendimiento, usan un 25% menos de agua de riego y ahorran casi un 25% en los costos de producción, en comparación con los sistemas de siembra en plano. A pesar de esto, la mayoría de los agricultores siguen usando labranza convencional, haciendo las camas para cada nuevo cultivo (Aquino, 1998). En 1991, el Dr. Ken D. Sayre del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) mostró interés en desarrollar nuevas tecnologías de producción en camas con base en los principios de la agricultura de conservación. A raíz de esto en el CIMMYT se inició en 1992 con un ensayo a largo plazo en su estación experimental ubicada en Ciudad Obregón, en el Valle del Yaqui, a fin de comparar las prácticas del agricultor con el sistema de camas permanentes. Estas camas son formadas inicialmente durante un último ciclo de labranza; a partir de ahí, son reutilizadas para sembrar el cultivo siguiente, con sólo re-formarlas superficialmente (CIMMYT, 2008).

Un experimento realizado de 1992 a 1995 en España, demostró que el porcentaje de infiltración del agua de riego fue significativamente más alto en la AC, en comparación con labranza convencional (Moreno et al., 1997). Unos cuantos estudios han comparado las rotaciones algodón-trigo y labranza mínima con siembra continua de algodón y labranza convencional y encontraron que las rotaciones de trigo y la labranza mínima mejoraron significativamente el uso de agua y el nivel de extracción de agua (Hulugalle y Entwistle, 1997b; Hulugalle et al., 1997a), el uso eficiente de agua en algunos años y su aplicación eficiente en todos los años (Tennakoon y Hulugalle, 2006). Sayre y Hobbs (2004) reportan un ahorro de agua de un 25% a 35% para trigo en Turquía y Kazakstán. Agricultores

de Haryana, en India comprobaron que en las parcelas con cero labranza, el trigo aprovecha la humedad residual del suelo en los arrozales y el agua cubre el suelo más rápido, ahorrando líquido y combustible para el bombeo en condiciones de riego. Los agricultores que aplicaron cero labranza ahorraron 340 metros cúbicos de agua de riego por hectárea por ciclo, invirtieron 6.4 horas menos por hectárea en el riego, aplicaron más de 13% menos agua y sus rendimientos aumentaron (CIMMYT, 2008).

2.3 Erosión hídrica del suelo.

La erosión del suelo es uno de los más serios problemas en la agricultura, porque esto reduce la fertilidad del suelo y contamina las aguas superficiales. (Fernández-Gómez et al., 2004). La erosión de los suelos agrarios en Europa (al igual que en cualquier otra área del planeta) se produce principalmente porque los sistemas de producción agrícola convencionales no dejan el rastrojo de la cosecha anterior en la superficie y dejan el suelo desnudo durante la estación lluviosa. El laboreo excesivo del suelo y el que se lleva a cabo en condiciones de baja humedad, deterioran la estructura del suelo e incrementan su riesgo de erosión por el agua y aire principalmente (González, 2005). Bajo condiciones de riego en surcos, hay una variedad de factores interactuando que afectan la erosión del suelo; entre estos están; la velocidad del flujo de entrada del agua, la pendiente del campo y el tipo de suelo (Fernández-Gómez et al., 2004). Miller y Aarstad (1983) aplicaron riego en surcos con diferentes cantidades de residuos y midieron la infiltración del

agua de riego, la descarga de sedimentos, la turbidez del agua de salida y la erosión del suelo, encontrando que los residuos en el riego en surcos controlan la erosión y reduce la turbidez del agua de salida del riego. La AC mejora el tamaño de distribución de los agregados secos del suelo (Govaerts et al., 2009b; 2007b), el suelo se vuelve más estable y menos susceptible al deterioro estructural. A pesar de esto, son pocos los ensayos que se han llevado a cabo para evaluar la erosión causada por el agua de riego con sistema de surcos bajo agricultura de conservación.

2.4 Desarrollo del cultivo.

A pesar de las variaciones en el área dedicada a su siembra, el trigo ha sido en los últimos 30 años el principal cultivo en el ciclo otoño-invierno en el estado de Sonora, particularmente en el Valle del Yaqui (INIFAP 2001). El desarrollo del trigo se ve afectado por distintos factores. Los factores ambientales y las prácticas culturales influyen en la tasa de formación y el número total de primordios florales en la espiga (Ma y Smith, 1992). Estudios han demostrado que la temperatura en el crecimiento y desarrollo de las plantas es ampliamente reconocida; la temperatura afecta a los procesos de crecimiento como expansión foliar, tasa de asimilación neta, tasa de aparición de hojas y tasa relativa de crecimiento (Milthorpe, 1959). Se ha reportado que las temperaturas altas en trigo, aumentan la expansión foliar y acortan el tiempo de llegada de la etapa de floración (Castañeda et al., 2004).

Algunos autores (Alvarez, 2009; Ben-Hammouda et al., 2008; Moreno et al., 1997) reportan que el rendimiento en trigo es poco o nada afectado por el sistema de labranza que se utilice. Moreno et al. (1997) encontraron, en un estudio realizado de 1992 a 1995, que la altura de planta y longitud de raíz es mayor cuando se utiliza labranza convencional, en comparación con AC; sin embargo los efectos de los sistemas de labranza pueden variar en un amplio rango de suelos y condiciones climáticas (Moreno et al. 1997). Pero es poca la información que se tiene acerca del efecto de la AC sobre el desarrollo del trigo.

2.5 Estrés hídrico (Sequia).

El estrés hídrico del cultivo se da cuando la planta no puede extraer agua del suelo a través de sus raíces a la misma velocidad con la que pierde humedad de la superficie de sus hojas (Benites y Castellanos, 2003). El estrés hídrico afecta el crecimiento de las plantas, el metabolismo y el rendimiento (Lewis et al., 1974). La ocurrencia simultánea de temperatura alta y estrés hídrico en la fase de llenado de grano, puede provocar reducciones significativas en el rendimiento (Kobata et al., 1992). Por lo anterior, es de gran importancia una determinación acertada y a tiempo del efecto del déficit de agua en la reducción del rendimiento (Ayodele y Ayorinde, 2004).

Una precipitación pluvial irregular o insuficiente en tierras secas, puede ser una seria limitación para la producción agrícola e incluso significar el fracaso del cultivo (Benites y Castellanos, 2003). La labranza modifica algunas propiedades físicas,

afectando la estructura, la densidad aparente, la distribución de poros, la dinámica del agua y la resistencia a la penetración. La retención de humedad del suelo está influida por la distribución del espacio poroso afectando la disponibilidad de agua, nutrientes y la aireación del suelo (Lal, 1994). Estudios recientes muestran que la humedad del suelo con labranza convencional con residuos y labranza sin residuos es significativamente más baja que en suelos con labranza cero con retención de residuos (Govaerts et al., 2009a). La humedad disponible para las plantas es mayor y el estrés hídrico debido a la sequía es menor bajo labranza cero que bajo los métodos de labranza convencional (Shaxson y Barber, 2005). Sin embargo, es poca la información que se tiene acerca de la influencia del tipo de sistema de labranza sobre la respuesta del cultivo a la sequía. Por esto, en el 2006 se inició en CIMMYT un *ensayo para evaluar la resistencia a los efectos del cambio del cambio climático*, en el cual se evalúa el efecto que tienen diferentes sistemas de labranza sobre la respuesta del cultivo a la sequía.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Caracterización de los experimentos de campo.

Los experimentos se encuentran en la estación de investigación Centro de Investigaciones Agrícolas del Noroeste (CIANO), cerca de Ciudad Obregón, Estado de Sonora, México (Lat. 27.29° N, Lon.109.55° W, 38 m snm). La temperatura anual promedio es de 24.9 °C (1981–2000) y el promedio anual de lluvia es 384.1 mm. La cual es rebasada por el promedio anual de evaporación de 2233.8 mm (1971-2000) (CNA, Servicio Meteorológico Nacional).

El tipo de suelo en la estación del CIANO es una arcilla arenosa común, Chromic Haplotorrert (Hyposodic Vertisol (Calcaric, Chromic)), bajo en materia orgánica (<1%) y ligeramente alcalino (pH 7.7).

3.2 El ensayo de sustentabilidad a largo plazo.

El experimento empezó en 1992. Una descripción detallada del manejo de parcelas ha sido reportado en Limón-Ortega et al. (2000). El manejo de cultivos es por rotación de cultivos anual: trigo como cultivo de invierno sembrado de finales de Noviembre a principios de Diciembre y cosechado en Mayo, seguido por maíz como cultivo de verano sembrado en Junio en las mismas parcelas cada año y cosechado en Octubre. Ambos cultivos se siembran en camas de 0.75 m con trigo en dos hileras sembrados con 20 cm de separación y maíz en una hilera. Durante el ciclo de cultivo (2008 – 2009) se sembró la variedad de trigo Samayoa C2004, una variedad de trigo duro (*Triticum durum* L.) que se caracteriza por su resistencia a la roya de la hoja (*Puccinia recondita*) enfermedad que prevalece en áreas productoras del noroeste de México (INIFAP, 2005). La tasa de siembra es de 130 kg/ha. En el ciclo otoño-invierno 2008-2009 la fecha de siembra fue el 4 de diciembre de 2008. La fecha de 50% de emergencia el día 12 de diciembre de 2008 (8 días después de la siembra), la fecha de inicio de la floración fue el 19 de febrero de 2009 (77 días después de la siembra).

El experimento incluye 5 tratamientos de labranza-residuos y tres repeticiones de cada tratamiento en un diseño de bloques completos al azar con un arreglo de tratamientos en parcelas principales y parcelas divididas. El arreglo de las parcelas principales es el siguiente:

- 1. CC-rastrajo incorporado.** Labranza convencional, con camas que se forman después de cada cultivo. Los residuos de trigo y maíz son incorporados con el arado.
- 2. CP-rastrajo quemado.** Cero labranza con una continua reutilización de las camas existentes, que son reformadas tanto como sea necesario. Los residuos de ambos cultivos trigo y maíz son quemados.
- 3. CP-rastrajo removido.** Cero labranza con una continua reutilización de las camas existentes, que son reformadas tanto como sea necesario. Se remueven todos los residuos de maíz y se remueven solo los residuos de trigo cortados por la trilladora.
- 4. CP-rastrajo parcialmente removido.** Cero labranza con una continua reutilización de las camas existentes, que son reformadas tanto como sea necesario. Los residuos de maíz son removidos para empacarse y la paja de trigo se deja en la superficie del suelo.
- 5. CP-rastrajo retenido.** Cero labranza con una continua reutilización de las camas existentes, que son reformadas tanto como sea necesario. Los residuos de maíz y trigo se dejan en la superficie del suelo.

Durante el invierno las parcelas divididas incluyen siete tratamientos de Nitrógeno. Los tratamientos son:

0 kg N/ha

50 kg N/ha basal en banda en el surco y 100 kg N/ha en banda en el surco en la etapa de primer nudo.

150 kg N/ha basal en banda en el surco.

100 kg N/ha basal en banda en el surco y 200 kg N/ha en banda en el surco en la etapa de primer nudo.

300 kg N/ha basal en banda en el surco.

150 kg N/ha en banda en el surco en la etapa de primer nudo.

300 kg N/ha en banda en el surco en la etapa de primer nudo.

El Nitrógeno es aplicado como urea al fondo del surco e incorporado a través del riego. Cada año el trigo y el maíz reciben 45 kg P_2O_5 /ha y se colocan en banda en el surco y se incorporan por la labranza cuando se reformen las camas.

La Figura 1. Presenta un mapa del ensayo de sustentabilidad a largo plazo con las ubicaciones de los tratamientos particulares.

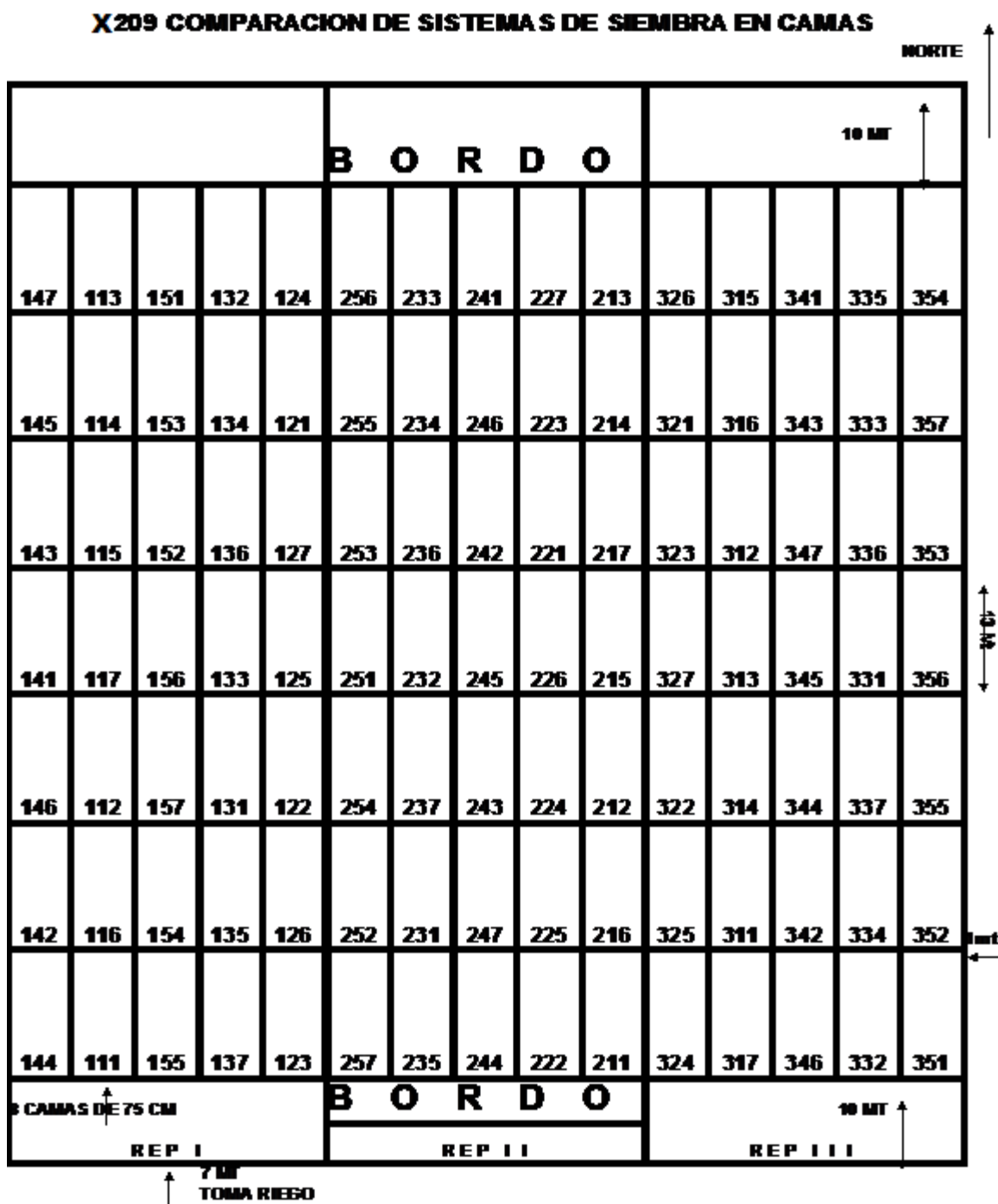


Figura 1. Mapa de ensayo de sustentabilidad a largo plazo. Los números de los tratamientos (XYZ) se componen de la repetición (X, 1-3), de la forma de labranza y el manejo de paja (Y, 1-5) y del tratamiento de fertilización (Z, 1-7).

En el lado sur del experimento se encuentra la toma de agua para el riego, el cual es aplicado en surcos utilizando tuberías con agujeros para cada surco.

Se aplicó un riego de presiembra y 4 riegos de auxilio durante todo el ciclo del cultivo. El riego de presiembra se realizó el 14 de noviembre de 2008, el primer riego de auxilio el 16 de enero 2009 (43 días después de la siembra. Estado de la planta: tallo principal con dos macollos), el segundo riego de auxilio el 11 de febrero 2009 (68 días después de la siembra. Estado de la planta: emerge la mitad de la espiga), el tercer riego de auxilio el 4 de marzo de 2009 (89 días después de la siembra. Estado de la planta: floración completada) y el cuarto riego de auxilio fue el día 23 de marzo de 2009 (108 días después de la siembra. Estado de la planta: espiga con grano masoso) (Howard y Gómez, 2001).

El riego de presiembra permite la emergencia de la maleza antes de la germinación del trigo. Para controlar la maleza se aplicó un herbicida sistémico no selectivo (04/12/08; Faena Fuerte ®, Ingrediente activo: Glifosato, 3l/ha). Durante el ciclo de cultivo se hizo una aplicación (28/01/09; Perfekthion ®, ingrediente activo: Dimetoato; 750 cm³/ha) para el control del pulgón verde de la hoja (*Schizaphis graminum* Rond.).

Para el estudio se evaluaron los cinco diferentes tratamientos de labranza y manejos de paja, con tres tratamientos de fertilización de nitrógeno (0 kg N/ha, 150 kg N/ ha, 300 kg N/ ha) de aplicación basal.

3.3 El ensayo para evaluar la resistencia a los efectos del cambio climático .

Este ensayo se inició en 2006 con el objetivo principal de crear opciones para mitigar el efecto y adaptarse al cambio climático. Se investiga asimismo, los efectos de la labranza y el manejo de residuos; la frecuencia del riego y el manejo de N en trigo y el rendimiento de trigo de invierno y maíz de verano; el uso de agua y de N.

La rotación de cultivos, la variedad de trigo sembrada, así como la densidad de siembra es igual que en el ensayo de sustentabilidad a largo plazo; pero las camas son de 0.80 m de ancho. En el ciclo de invierno 2008/2009 la fecha de siembra fue el 4 de diciembre de 2009. La fecha de 50% de emergencia el día 11 de diciembre (7 días después de la siembra), la fecha de inicio de floración fue el 16 de febrero de 2009 (74 días después de la siembra).

El experimento incluye dos repeticiones de cada tratamiento en un diseño de bloques al azar con arreglo de tratamientos de parcela principal, parcela dividida y parcela dividida-dividida. Hay dos ambientes: camas con labranza convencional y el otro con camas permanentes. Las parcelas principales consisten de tratamientos de riego; con riego normal (1 riego de presiembra y 4 de auxilio) contra riego reducido (1 riego de presiembra y 1 riego de auxilio). Las parcelas divididas consisten de diferentes manejos de labranza- residuo.

El arreglo de las parcelas divididas es el siguiente:

- 1. CC- residuo retenido-normal:** Labranza convencional, con camas que se forman después de cada cultivo. Los residuos de trigo y maíz son incorporados con el arado. Recibe 1 riego de presiembra y 4 de auxilio.
- 2. CC- residuo retenido-reducido:** Labranza convencional, con camas que se forman después de cada cultivo. Los residuos de trigo y maíz son incorporados con el arado. Recibe 1 riego de presiembra y 1 de auxilio.
- 3. CP- residuo retenido-reducido:** Cero labranza con una continua reutilización de las camas existentes, que son reformadas tanto como sea necesario. Los residuos de maíz y trigo se dejan en la superficie del suelo. Recibe 1 riego de presiembra y 1 de auxilio.
- 4. CP- residuo removido-reducido:** Cero labranza con una continua reutilización de las camas existentes, que son reformadas tanto como sea necesario. Los residuos de maíz son removidos para empacarse y la paja de trigo se deja en la superficie del suelo. Recibe 1 riego de presiembra y 1 de auxilio.
- 5. CP- residuo removido-normal:** Cero labranza con una continua reutilización de las camas existentes, que son reformadas tanto como sea necesario. Los residuos de maíz son removidos para empacarse y la paja de trigo se deja en la superficie del suelo. Recibe 1 riego de presiembra y 4 de auxilio.
- 6. CP- residuo retenido-normal:** Cero labranza con una continua reutilización de las camas existentes, que son reformadas tanto como sea necesario. Los residuos de maíz y trigo se dejan en la superficie del suelo. Recibe 1 riego de presiembra y 4 de auxilio.

Las parcelas divididas-divididas comprenden siete tratamientos de N.

Los tratamientos son:

0 kg N/ha

76 kg N/ha aplicados antes de la formación de las camas y 38 kg N/ha en el estado de 1er nudo. (Total 114 kg N/ha)

57 kg N/ha aplicados antes de la formación de las camas y 57 kg N/ha en el estado de 1er nudo. (Total 114 kg N/ha)

38 kg N/ha aplicados antes de la formación de las camas y 76 kg N/ha en el estado de 1er nudo. (Total 114 kg N/ha)

152 kg N/ha aplicados antes de la formación de las camas y 76 kg N/ha en el estado de 1er nudo. (Total 228 kg N/ha)

114 kg N/ha aplicados antes de la formación de las camas y 114 kg N/ha en el estado de 1er nudo. (Total 228 kg N/ha)

76 kg N/ha aplicados antes de la formación de las camas y 152 kg N/ha en el estado de 1er nudo. (Total 228 kg N/ha)

La Figura 2. Presenta un mapa del ensayo de para evaluar el cambio climático con las ubicaciones de los tratamientos particulares.

X 218 COMPARACION DE CAMAS CON LABRANZA Y CAMAS PERMANENTES PARA RIEGO NORMAL Y REDUCIDO CON MANEJOS DIFERENTE DE NITROGENO

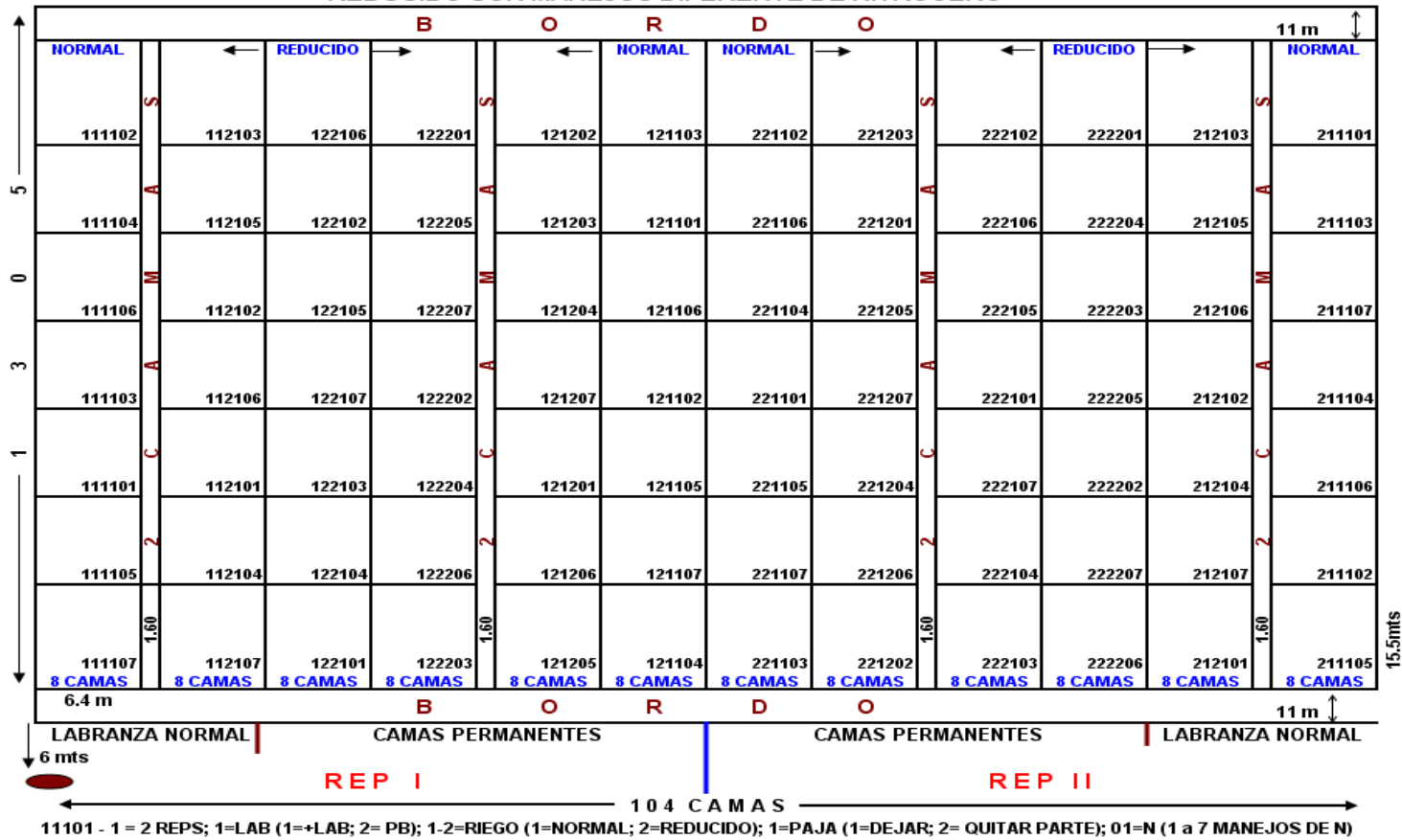


Figura 2. Mapa del ensayo para evaluar el cambio climático. Los números de los tratamientos (1er, 2do, 3ero, 4to y 6to) se componen de la repetición (1ro: 1= Rep 1; 2 = Rep 2), la forma de labranza (2do: 1= CTB; 2=PB), el riego (3ero: 1= normal; 2= reducido), el manejo de residuos (4to: 1= retener todo; 2=quitar parte) y el manejo de N (6to: números 1-7 diferentes niveles de fertilización nitrogenada)

En el lado sur del experimento se encuentra la toma de agua para el riego, el cual es aplicado en surcos utilizando tuberías con agujeros para cada surco.

El riego de presembrado se realizó el 15 de noviembre de 2008 para todos los tratamientos. La cronología de los riegos de auxilio fue la siguiente: el primer riego de auxilio fue el 12 de enero 2009 para los tratamientos con riego normal (39 días después de la siembra; estado de planta: tallo principal con 1 macollo), el día 7 de febrero de 2009 (65 días después de la siembra; estado de la planta: emerge 1/4 de la espiga) fue el segundo riego de auxilio para los tratamientos con riego normal y el único auxilio para los tratamientos con riego reducido, el tercer riego de auxilio el 27 de febrero de 2009 (85 días después de la siembra; estado de planta: mitad de la floración completa) y el cuarto riego de auxilio fue el día 20 de marzo de 2009 (106 días después de la siembra: estado de grano masoso) (Howard y Gómez., 2001).

El control de maleza y de plagas se realizó de la misma manera que en el ensayo de sustentabilidad a largo plazo (en las fechas: 4/12/08 y 28/01/09 respectivamente).

Para el estudio se evaluaron los diferentes tratamientos de labranza-residuos y los dos tratamientos de riego con tres tratamientos de fertilización de nitrógeno (0 kg N/ha, 76+38 kg N/ ha, 152+76 kg N/ ha) de aplicación basal.

3.4 Parámetros de medición del suelo.

3.4.1 Erosión hídrica del suelo.

La erosión del suelo se evaluó durante todos los riegos en el *ensayo de sustentabilidad a largo plazo* en 3 tratamientos diferentes de paja y labranza: camas con labranza convencional con paja incorporada (CTB-paja incorporada) y camas permanentes con quema de paja (PB-quema de paja) y con retención de paja (PB-paja retenida).

Se tomaron muestras con botellas de plástico con una capacidad máxima de 550 ml, las cuales fueron llenadas al máximo posible de su capacidad con el agua de riego antes de la salida de agua cada parcela principal. Se realizaron 5 muestreos con 2 repeticiones en cada parcela principal a intervalos de tiempo regulares durante todo el riego.

Se pesaron las botellas con las muestras de agua y se vertió el contenido en charolas de aluminio. Las muestras fueron introducidas en un horno a una temperatura de 105 °C durante 24 horas, para obtener el peso seco del suelo contenido en la muestra. Posteriormente las charolas y las botellas vacías fueron pesadas para calcular la concentración de suelo en la muestra, como un indicador de la erosión de suelo causada por el agua de riego.

3.4.2 Contenido de humedad del suelo.

En el *ensayo de sustentabilidad a largo plazo* el contenido de humedad del suelo se determinó el día antes de cada riego, una semana después del riego y una vez más entre riegos en parcelas divididas con una aplicación basal de 0 y 300 kg de N/ha y cada semana en parcelas divididas con una aplicación basal de 150 kg de N/ha (como fuese posible).

Dos muestras de cada profundidad (0-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm, 45-60 cm) en diferentes puntos de la cama 2 y 7 fueron tomadas por parcela dividida y fueron mezcladas por profundidad para obtener una muestra compuesta. Después de ser pesadas; y registrado el peso; las muestras fueron introducidas en un horno por 48 horas a 105°C y pesadas nuevamente para registrar el peso seco.

La siguiente ecuación fue usada para obtener la humedad gravimétrica contenida por muestra (White, 2006).

$$m_{wet} = \frac{m_{dry} + m_{water}}{m_{dry}}$$

Donde m_{wet} es el peso del suelo húmedo y m_{dry} el peso suelo seco.

El contenido de humedad volumétrica fue determinado multiplicando el contenido de humedad gravimétrica por la respectiva densidad aparente (White, 2005)

En el *ensayo para evaluar la resistencia a los efectos del cambio climático* la humedad del suelo fue medida el día antes de cada riego, una semana después del riego y una vez más entre riegos en parcelas divididas con una aplicación de 0/0 y 152/176 kg de N/ha y cada semana en parcelas divididas con una aplicación de 76/38 kg de N/ha.

La metodología seguida para el muestreo y el cálculo volumétrico de la humedad fue la misma que en el *ensayo de sustentabilidad a largo plazo*.

3.5 Desarrollo del cultivo durante el ciclo de cultivo

3.5.1 Diferencia Normalizada del Índice Vegetativo (NDVI).

El GreenSeeker™ Unidad de Sensor Óptico Portable (NTech Industries, Inc.) fue usado para recolectar la diferencia normalizada del índice vegetativo (NDVI).

Este implemento usa una técnica patentada para medir la reflectancia del cultivo y para calcular el NDVI. El sensor tiene una iluminación propia en la banda roja (650 ± 10 nm) y la banda del infrarrojo cercano (Near Infrared, NIR, 770 ± 15 nm). El dispositivo mide la fracción de la luz emitida por la superficie y la que regresa al sensor (reflectancia). Estas fracciones se usan dentro del sensor para elaborar el NDVI según la siguiente ecuación:

Donde:

F_{NIR} = Fracción de NIR emitida y regresada por la superficie registrada.

F_{RED} = Fracción de la banda roja emitida y regresada por la superficie registrada.

La unidad registra una superficie de 0.6×0.01 m cuando esta posicionado a una distancia de aproximadamente de 0.6 a 1.0 m encima de la superficie del cultivo. La unidad sensor está diseñada para ser manejada manualmente (“hand-held”) y las mediciones son tomadas pasando el sensor por la superficie del cultivo en el rango de altura mencionado.

El sensor toma muestras a una velocidad muy alta (aproximadamente 1000 mediciones por segundo) y las promedia por salida. Las salidas del sensor del NDVI están a una tasa de 10 lecturas por segundo. En cada muestreo se tomó

una medición sobre las camas y una entre las camas centrales. Para la medición sobre las camas, el sensor se pasó sobre el cultivo a una altura de aproximadamente 0.8 m sobre la superficie del cultivo y orientado a fin de que a los 0.6 m la anchura estuviera perpendicular al surco y centrado sobre el surco. Para la medición entre las camas, se midió el NDVI a la misma altura sobre las camas. Con el estado avanzado de crecimiento del cultivo, la altura de la posición del sensor fue incrementando proporcionalmente. Las velocidades de recorrido fueron de 1 m/s aproximadamente, resultando en lecturas de NDVI promediadas en las distancias de < 0.10 m.

El promedio de NDVI, la desviación estándar y el coeficiente de varianza se calcularon para cada secuencia de muestreo. El NDVI fue medido en ambos ensayos 2 veces por semana, excepto durante la semana después de cada riego, durante todo el ciclo de cultivo con selección de Niveles de nitrógeno, empezando a los 15 días después de la siembra.

3.5.2 Cobertura del suelo por el follaje.

En el *ensayo de sustentabilidad a largo plazo* la cobertura del suelo por el follaje se calculó en las parcelas con los tratamientos de fertilización con N de 0 kg N/ha, 150 kg N/ ha, 300 kg N/ ha. Una regla de madera de 1,50 m se colocó sobre el terreno de manera perpendicular a las 2 camas centrales (4 y 5) en tres puntos por

parcela. Una fotografía fue tomada por encima de la parcela, de forma que la foto abarque la regla por ambos lados. Al utilizar Microsoft Office Picture Manager, se cortó cada foto al tamaño de la regla, para que todas tuvieran el mismo tamaño representativo. Se utilizó el programa Adobe Photoshop CS3, para calcular la cobertura del suelo por el follaje como una diferencia entre la cantidad de píxeles verdes y todos los píxeles de cada fotografía.

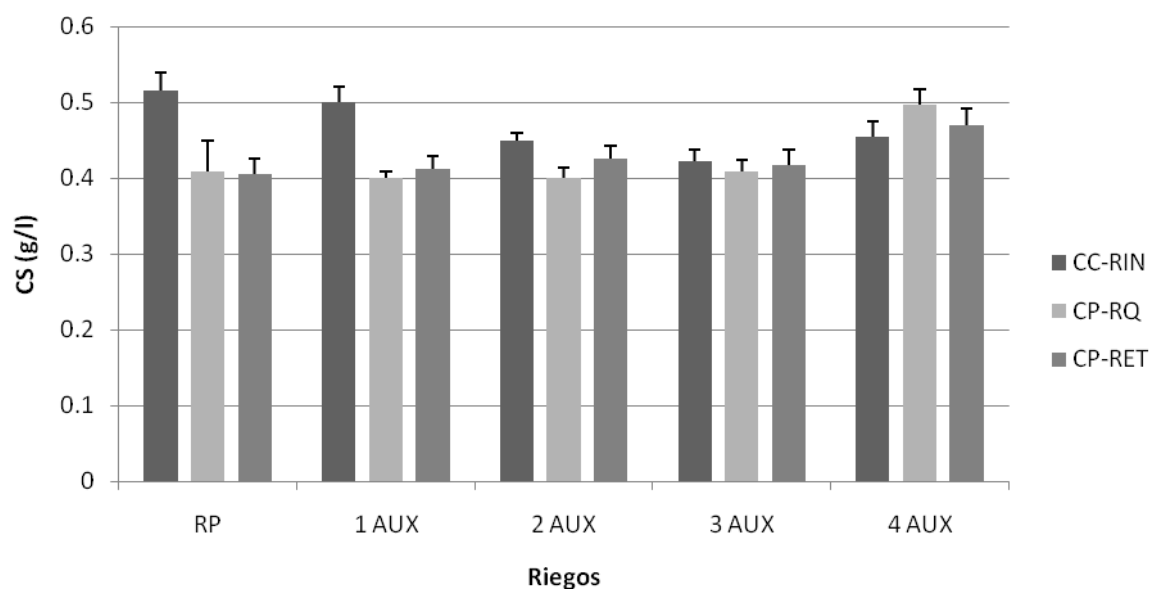
En el *ensayo para evaluar la resistencia a los efectos del cambio climático* se siguió la misma metodología en los tratamientos con los niveles de fertilización de 0 kg N/ha, 76/38 kg N/ ha, 152/76 kg N/ ha, cambiando el tamaño de la regla por una de 1.60 m, con el fin de que abarcara las dos camas centrales (camas de .80m).

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Ensayo de sustentabilidad a largo plazo

4.1.1 Parámetros de medición del suelo

4.1.1.1 Erosión Hídrica del suelo. Solo en los primeros tres riegos (Riego de presembrado, 1er y 2do auxilio) hubo diferencia significativa en la erosión del suelo causada por el agua de riego ($P < 0.05$). Los valores más altos de concentración de suelo en el agua saliendo del campo se da en CC-residuos incorporado, comparado con CP-rastrojo retenido o CP-rastrojo quemado. En los 2 últimos riegos (3 AUX y 4 AUX) no se observa diferencia significativa entre los tratamientos (Figura 3).



CC=camas convencionales, CP=camas permanentes, RIN=rastrojo incorporado, RQ= rastrojo quemado y RET=rastrojo retenido. CS=concentración de suelo, RP=riego de presembrado, 1AUX=1er riego de auxilio, 2AUX=2do riego de auxilio, 3AUX=3er riego de auxilio y 4AUX=4to riego de auxilio.

Figura 3. Efecto de la labranza y manejo de residuos, sobre la concentración de suelo en el agua de salida durante los riegos aplicados al cultivo. Valor medio con letra diferentes, es diferente significativamente según la prueba de t-student (LSD) a $P < 0.05$.

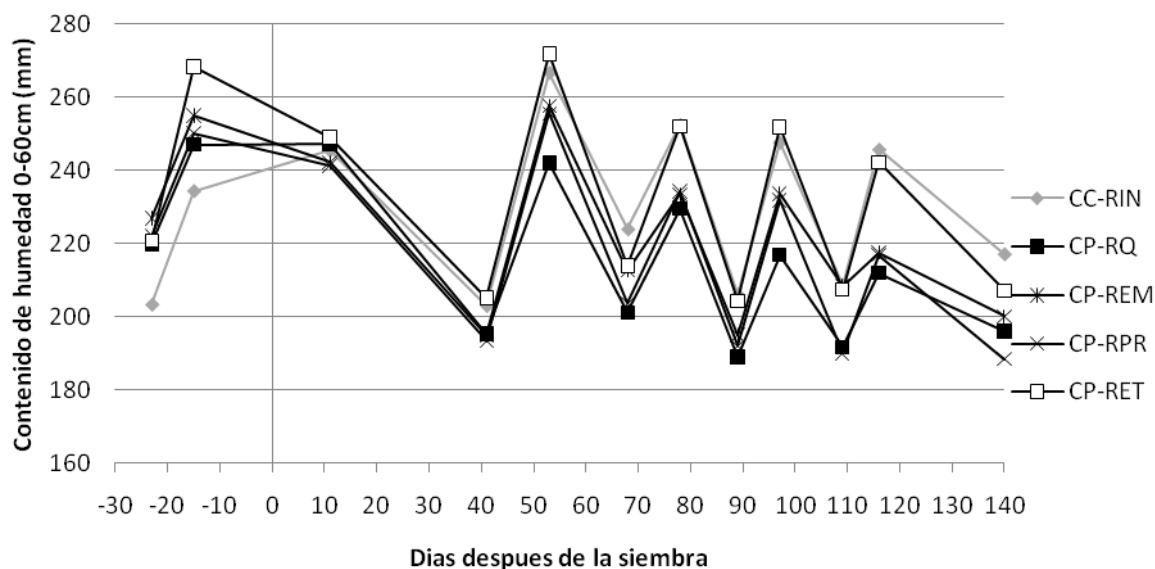
Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos por Blevins et al. (1977) en un estudio donde se comparó por 7 años un sistema de cero labranza con rotación

soya-trigo con retención total de los residuos con un sistema de labranza convencional, donde se encontró que la cero labranza con la retención de residuos disminuye considerablemente la erosión y el escurrimiento del suelo debido a una mayor conservación del agua en estos sistemas.

El comportamiento en los tres primeros riegos puede deberse a que en la labranza convencional se reducen o se rompen los agregados del suelo, lo cual es el resultado directo e indirecto de los efectos de la labranza (Beare et al., 1994; Six et al., 1998). La perturbación física de la estructura del suelo por la labranza resulta en un rompimiento directo de los agregados del suelo (Six et al., 2000). Se ha reportado que incluso cuando la labranza convencional resulta en una buena distribución estructural en el suelo, los componentes estructurales son más débiles para resistir el deterioro por el agua de riego que en situaciones de cero labranza, donde el suelo se vuelve más estable y menos susceptible al deterioro estructural (Verhulst et al., 2009a). En los últimos dos riegos donde la erosión en el sistema de labranza convencional ya no es tan grande, puede deberse a que ya se ha perdido la parte estructuralmente más débil de la superficie del suelo.

La densidad aparente del suelo puede ayudar a comprender este comportamiento. Los resultados de densidad aparente (DA) del suelo encontrados en este ensayo, fueron que la DA es mayor al inicio del ciclo de cultivo para camas permanentes comparado con camas convencionales; pero con el paso del tiempo la DA del suelo con camas convencionales aumenta. Relacionando el aumento de la densidad aparente en el suelo con labranza convencional observado durante del ciclo de cultivo, con la pérdida de la capa superficial del suelo, se puede explicar que al final del ciclo ya no haya diferencia entre los tratamientos en erosión de suelo.

7.1.1.2 Contenido de humedad del suelo. Se calculó el contenido de humedad en mm para todo el perfil de 0 a 60 cm en cada nivel de fertilización. En la Figura 4 se muestra el contenido de humedad para todos los tratamientos bajo la fertilización de 0 nitrógeno. Se tienen valores de humedad significativamente más altos en el suelo con CC-rastrajo incorporado si se compara con CP-rastrajo quemado y CP-rastrajo parcialmente removido ($P < 0.05$). Las camas permanentes con rastrojo retenido en la superficie del suelo muestran un mayor contenido de humedad comparado con las camas permanentes con cualquier manejo de residuos (Figura 4); pero no hay diferencias significativas cuando se comparan con las camas convencionales con rastrojo incorporado ($P < 0.05$).

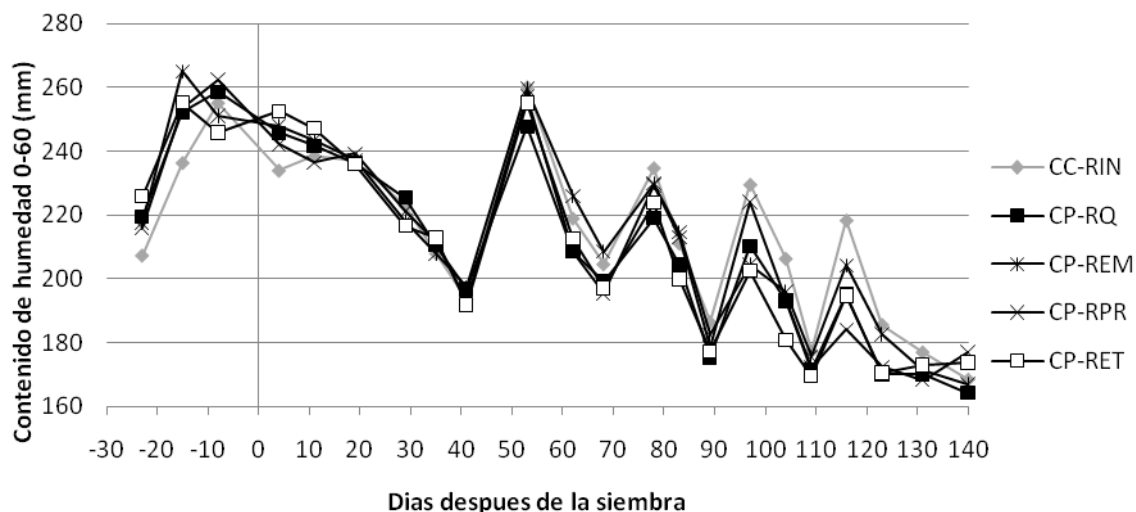


CC=camas convencionales, CP=camas permanentes, RIN=rastrajo incorporado, RQ= rastrojo quemado, REM= rastrojo removido, RPR= rastrojo parcialmente removido y RET= rastrojo retenido.

Figura 4. Efecto de los sistemas de labranza y manejo de rastrojo sobre el contenido de humedad de suelo en el perfil de 0-60 cm, a lo largo del ciclo de cultivo de trigo con 0 N de fertilización.

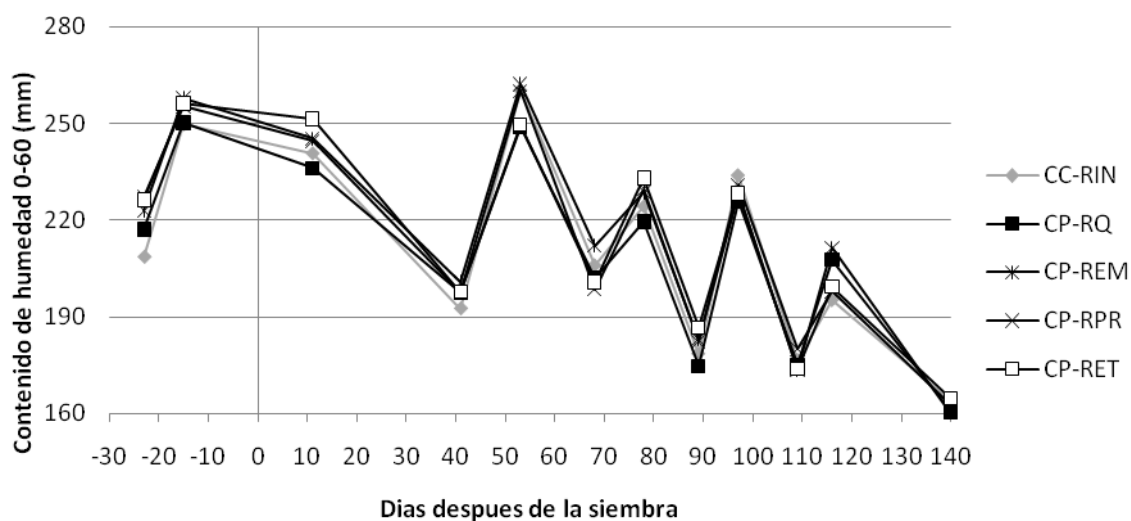
El mejoramiento de los agregados del suelo bajo sistemas sin labranza está asociado a la conectividad de los macroporos, lo cual afecta la infiltración y conductividad hidráulica (Strudley et al., 2008); al haber una mayor infiltración en suelos bajo labranza cero, aunado a una menor velocidad de evapotranspiración de suelos cubiertos por rastrojo bajo estos manejos, conduce muchas veces a un mayor contenido de humedad (Nielsen et al., 2005) y también a una mayor eficiencia en el uso de agua (Hatfield et al., 2001). La labranza mueve la humedad del suelo a la superficie, esto hace que la humedad se pierda más rápido (Hatfield et al., 2001). Blevins et al. (1971) y Papendic et al. (1973) mostraron que el movimiento de la superficie del suelo con la labranza incrementa la evaporación del agua comparado con zonas sin labranza. Este comportamiento se observa en la grafica 2 y 3 de una manera importante después del riego de presiembra, que es cuando el suelo ha sido removido en los tratamientos con camas convencionales. Más tarde en ciclo de cultivo la diferencia desaparece debido a los riegos y la compactación del suelo.

Cuando se hace la fertilización con 150 o 300 kg de N/ha, el comportamiento es similar en todos los tratamientos y no se observa diferencia significativa ($P < 0.05$) entre los tratamientos a lo largo del ciclo de cultivo (Figura 5 y 6).



CC=camas convencionales, CP=camas permanentes, RIN=rastrajo incorporado, RQ= rastrajo quemado, REM= rastrajo removido, RPR= rastrajo parcialmente removido y RET= rastrajo retenido.

Figura 5. Efecto de los sistemas de labranza y manejo de rastrajo sobre el contenido de humedad de suelo en el perfil de 0-60 cm, a lo largo del ciclo de cultivo de trigo con fertilización de 150 kg de N/ha.

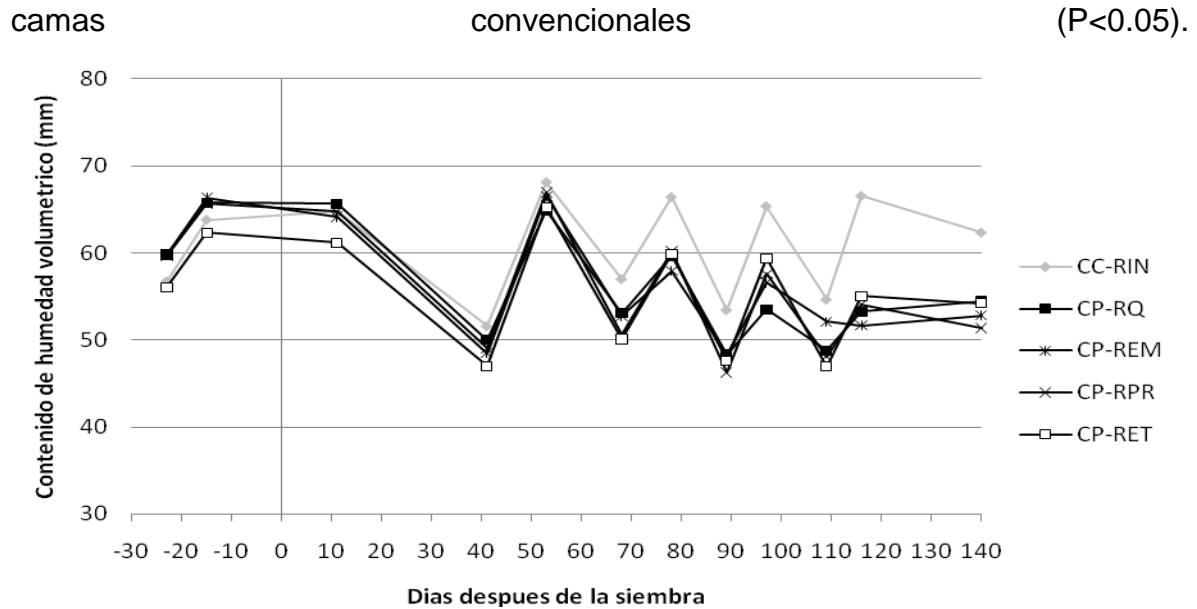


CC=camas convencionales, CP=camas permanentes, RIN=rastrajo incorporado, RQ= rastrajo quemado, REM= rastrajo removido, RPR= rastrajo parcialmente removido y RET= rastrajo retenido.

Figura 6. Efecto de los sistemas de labranza y manejo de rastrajo sobre el contenido de humedad de suelo en el perfil de 0-60 cm, a lo largo del ciclo de cultivo de trigo con fertilización de 300 kg de N/ha.

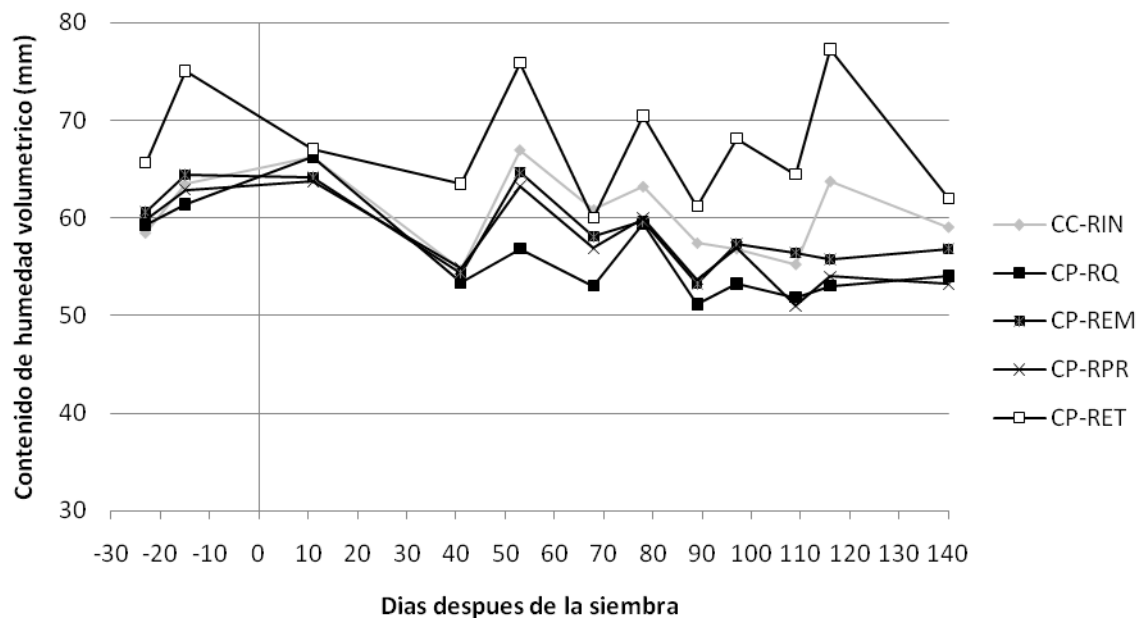
Bajo condiciones de fertilización nitrogenada no se observa diferencia entre los tratamientos labranza-rastrojo de una forma notable como en los tratamientos cuando se manejan con cero nitrógeno; esto puede ser porque cuando se hace un factor de crecimiento importante (como el nitrógeno) limitante, se expresan más marcadas las diferencias entre los diferentes sistemas.

El contenido de humedad en los diferentes niveles de fertilización de cada tratamiento en las respectivas profundidades es similar para todos los tratamientos de labranza-rastrojo, excepto en algunos casos. Cuando no se aplica nitrógeno en el perfil de 15 a 30 cm (Figura 7), donde se tiene un porcentaje de humedad significativamente más alto en CC-rastrojo incorporado comparado con CP-rastrojo retenido a lo largo de todo el ciclo de cultivo ($P < 0.05$). Este comportamiento es aun más evidente después del primer riego de auxilio (43 días después de la siembra). En el perfil de 30 a 45 cm también se observa diferencia entre los tratamientos cuando no se aplica fertilización nitrogenada (Figura 8), donde se tienen los valores de humedad significativamente más altos para CP-rastrojo retenido durante todo el ciclo de cultivo, comparado con los demás sistemas con camas permanentes; pero no hay diferencia significativa con las



CC=camas convencionales, CP=camas permanentes, RIN=rastrojo incorporado, RQ= rastrojo quemado, REM= rastrojo removido, RPR= rastrojo parcialmente removido y RET= rastrojo retenido.

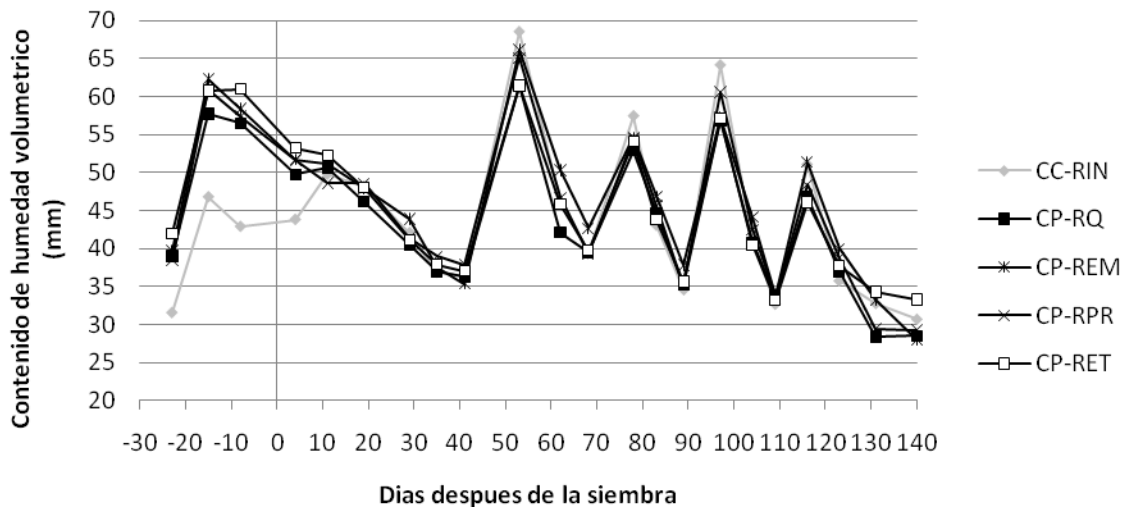
Figura 7. Efecto de la labranza y manejo de residuos sobre el contenido de humedad en el perfil de 15 a 30 cm, a lo largo del ciclo de cultivo de trigo con 0 N de fertilización.



CC=camas convencionales, CP=camas permanentes, RIN=rastrojo incorporado, RQ= rastrojo quemado, REM= rastrojo removido, RPR= rastrojo parcialmente removido y RET= rastrojo retenido.

Figura 8. Efecto de la labranza y manejo de residuos sobre el contenido de humedad en el perfil de 30 a 45 cm con 0 kg de N/ha.

Para el nivel de fertilización de 150 kg de N/ha (Figura 9) en los diferentes perfiles solo se observa diferencia entre los tratamientos en la profundidad de 0-15 cm, con valores de humedad significativamente mayores para camas permanentes donde no se queman los residuos comparados con CC-rastrojo incorporado ($P < 0.05$). Esto puede reflejar el efecto positivo de la cobertura del suelo por el rastrojo.



CC=camas convencionales, CP=camas permanentes, RIN=rastrojo incorporado, RQ= rastrojo quemado, REM= rastrojo removido, RPR= rastrojo parcialmente removido y RET= rastrojo retenido.

Figura 9. Efecto de la labranza y manejo de residuos sobre el contenido de humedad en el perfil de 0 a 15 cm con 150 kg de N/ha.

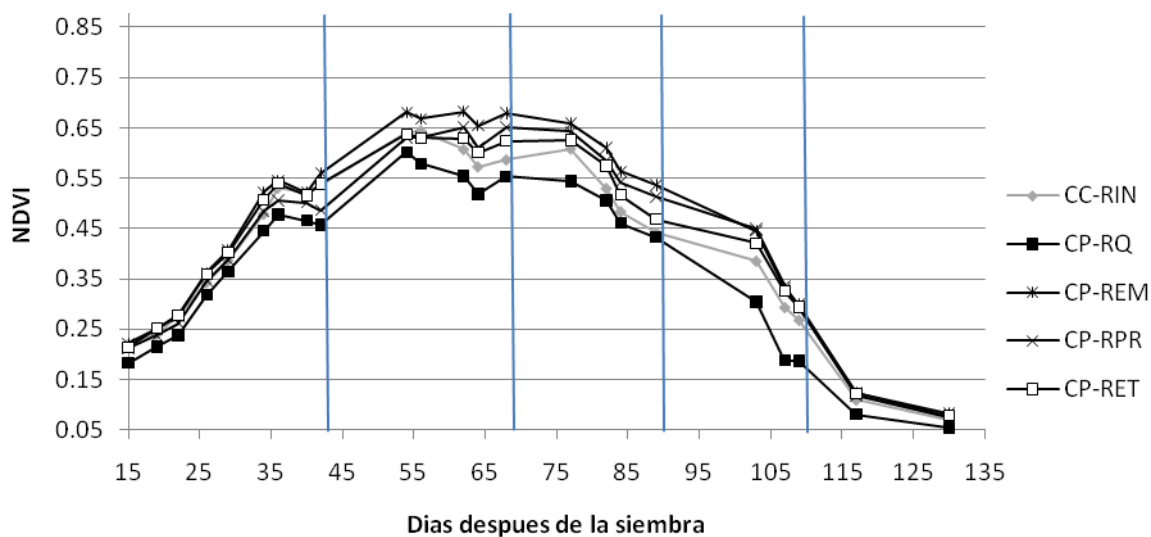
4.1.2 Desarrollo del cultivo durante el ciclo de cultivo.

4.1.2.1 Diferencia Normalizada del Índice Vegetativo (NDVI). El NDVI mide que tan “mejor” o verde está un cultivo, esto está relacionado con la actividad fotosintética y producción de biomasa de la planta. Cuando se tiene una fertilización nitrogenada nula y haciendo el análisis integrando todo el ciclo de cultivo, los valores de NDVI significativamente más altos ($P < 0.05$) se observan en CP-rastrojo removido, CP-rastrojo retenido y CP- parcialmente removido, comparados con las camas permanentes donde se quema el rastrojo. Viendo más en detalle las diferentes etapas del ciclo. Los valores de NDVI de CC-rastrojo incorporado, CP-rastrojo removido y CP-rastrojo retenido son significativamente más altos en el lapso de 15 a 54 días después de la siembra comparados con CP-rastrojo quemado ($P < 0.05$) (Figura 10). En el periodo de 56 a 84 días después de la siembra solo se observa diferencia entre los tratamientos con CP- rastrojo removido y CP-rastrojo quemado, con valores más altos para CP-rastrojo removido. Al final del ciclo de cultivo (día 89-130 después de la siembra) los valores de NDVI mas altos se obtienen en los tratamientos con camas permanentes donde no se queman los residuos comparado con las camas donde si se queman los residuos del cultivo.

Los resultados son diferentes a los obtenidos por Verhulst et al. (2009b) al inicio de la temporada donde los valores de NDVI mas altos se obtuvieron para CC-rastrojo incorporado comparado con camas permanentes y cualquier manejo de residuos. Sin embargo, son similares al final de la temporada con valores significativamente más altos de NDVI en camas permanentes con retención de residuos comparados con camas permanentes donde se queman y camas convencionales con residuos incorporados. Los resultados obtenidos al final del ciclo de cultivo son similares a los de Verhulst et al. (2009b) donde se encontró que los valores de NDVI en CC-rastrojo incorporado empezaron a decrecer más

rápidamente que los de CP-rastrajo parcialmente removido después de alcanzar su máximo desarrollo (54 días después de la siembra).

El manejo de CP-rastrajo quemado presenta los valores de NDVI más bajos a lo largo de todo el ciclo de cultivo, lo cual es un indicativo del peor desarrollo, mientras que los manejos de CP-rastrajo removido, CP-rastrajo parcialmente removido y CP-rastrajo retenido permanecen con un NDVI más alto y regular por más tiempo, que indica un mejor desarrollo y acumulación de biomasa. Sin embargo los valores de NDVI son bajos para todos los tratamientos debido al manejo con cero nitrógeno.

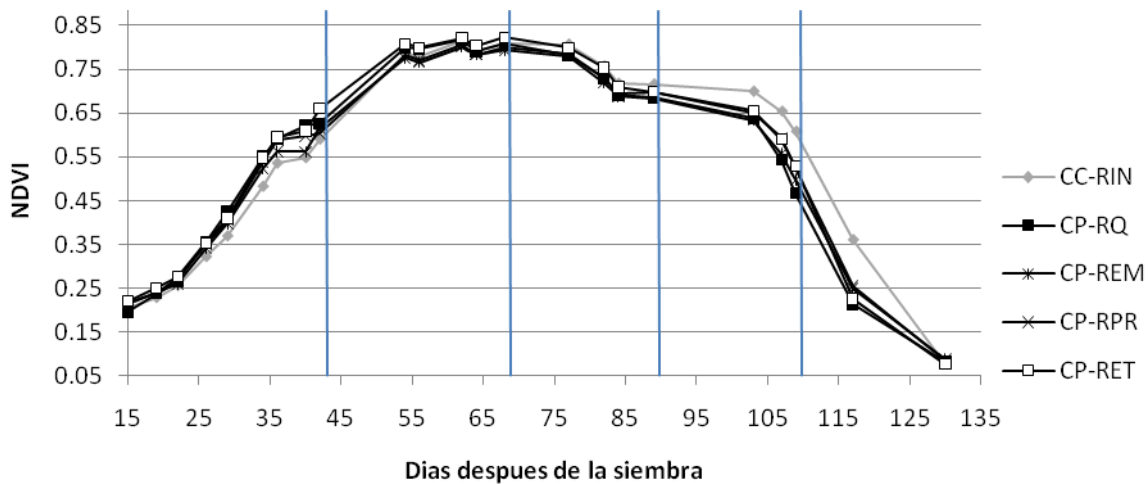


Las líneas verticales indican: 1ero, 2do 3ro y 4to riego de auxilio

CC=camas convencionales, CP=camas permanentes, RIN=rastrajo incorporado, RQ= rastrajo quemado, REM= rastrajo removido, RPR= rastrajo parcialmente removido y RET= rastrajo retenido.

Figura 10. Efecto de los sistemas de labranza y manejo de rastrajo sobre el NDVI durante el ciclo de cultivo de trigo con fertilización de 0 N.

En la Figura 11 se muestra el comportamiento de los valores de NDVI cuando se fertiliza con 150 kg de N/ha. Desde los 15 a 54 días después de la siembra donde el NDVI está aumentando no se observa diferencia entre los tratamientos ($P < 0.05$). A partir del día 56 hasta el día 84 después de la siembra el cultivo muestra un periodo estable en los valores de NDVI, donde no existe diferencia entre los tratamientos; lo que también reporta Verhulst et al. (2009b). Después los valores de NDVI empiezan a disminuir hasta el final del ciclo primero de manera lenta (día 89-103 después de la siembra) y después de manera rápida (día 103-130 después de la siembra). Durante este periodo (89-130 días después de la siembra), los valores de NDVI en CC-rastrajo incorporado son significativamente mayores que en CP-rastrajo quemado y CP-rastrajo removido ($P < 0.05$). Existe relación entre la humedad disponible para el cultivo y el desarrollo del cultivo: la humedad de suelo para CC-rastrajo incorporado aumenta justo después del 3er riego de auxilio (Figura 7), lo cual se refleja en los valores de NDVI (Figura 11).



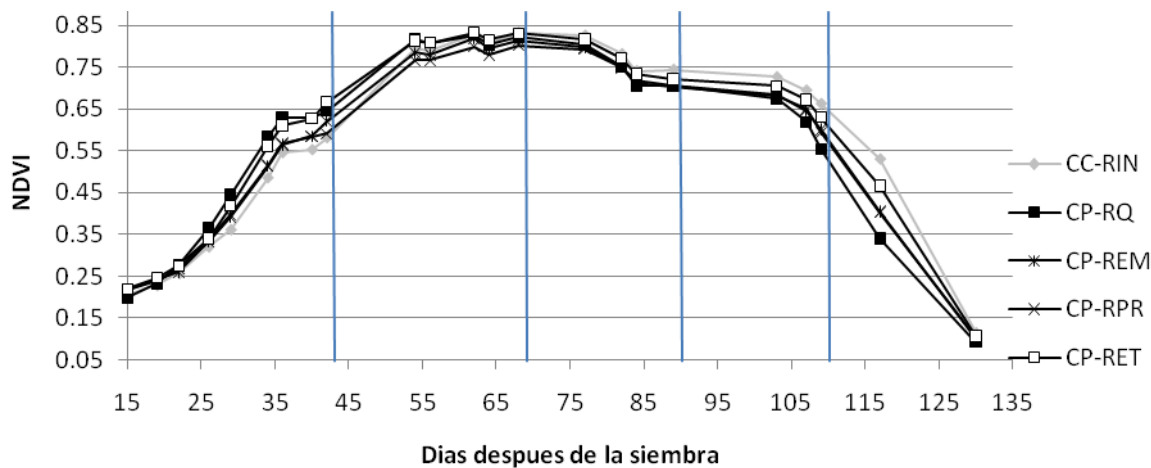
Las líneas verticales indican: 1ero, 2do 3ro y 4to riego de auxilio

CC=camas convencionales, CP=camas permanentes, RIN=rastrajo incorporado, RQ= rastrojo quemado, REM= rastrojo removido, RPR= rastrojo parcialmente removido y RET= rastrojo retenido.

Figura 11. Efecto de los sistemas de labranza y manejo de rastrojo sobre el NDVI durante el ciclo de cultivo de trigo con fertilización de 150 kg de N/ha.

El NDVI de cada tratamiento con nivel de fertilización de 300 kg N/ha se presenta en la Figura 12. Al principio del ciclo de cultivo (desde los 22 hasta los 43 días después de la siembra) no hay diferencia significativa entre los tratamientos ($P < 0.05$). Desde 56 a 89 días después de la siembra los valores de NDVI para CP-rastrojo quemado están significativamente menores comparados con CP-rastrojo removido. Los valores de NDVI en CP-rastrojo parcialmente removido son menores que en CC-rastrojo incorporado en el mismo período de tiempo ($P < 0.05$). Al final del ciclo de cultivo (103-130 días después de la siembra) hay una diferencia significativa con valores más altos de NDVI en CP-rastrojo retenido comparado con los demás manejos de residuos en camas permanentes; aun así los valores de NDVI son significativamente más altos para CC-rastrojo incorporado comparado con cualquier manejo de residuos con camas permanentes ($P < 0.05$).

Los resultados coinciden con los de Verhulst et al. (2009b) en la mitad de la temporada (etapa estable) donde se encontró que los valores de NDVI para CC-rastrojo incorporado son mayores que en CP-rastrojo parcialmente removido y al final de la temporada los valores de NDVI para CP-rastrojo quemado son menores que en CP-rastrojo incorporado y CC-rastrojo retenido ($P < 0.05$).



Las líneas verticales indican: 1ero, 2do 3ro y 4to riego de auxilio

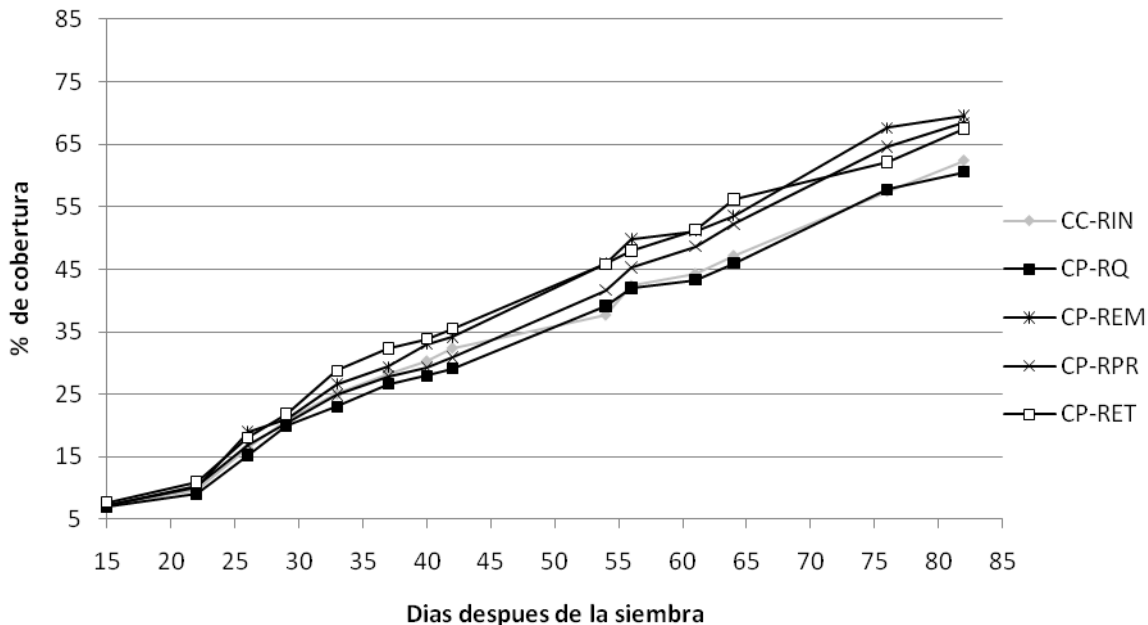
CC=camas convencionales, CP=camas permanentes, RIN=rastrajo incorporado, RQ= rastrajo quemado, REM= rastrajo removido, RPR= rastrajo parcialmente removido y RET= rastrajo retenido.

Figura 12. Efecto de los sistemas de labranza y manejo de rastrajo sobre el NDVI durante el ciclo de cultivo de trigo con fertilización de 300 kg de N/ha.

Los resultados obtenidos por Verhulst et al. (2009b) son diferentes al principio del ciclo de cultivo (10 a 54 días después de la siembra) donde se reporta que los valores de NDVI para CC-rastrajo incorporado son los más altos comparados con camas permanentes y cualquier manejo de residuos. Los resultados son similares al final ciclo de cultivo (118 a 124 días después de la siembra) con valores de NDVI menores en CP-rastrajo quemado comparados con camas permanentes con cualquier manejo de residuos. Pero son diferentes en este mismo periodo de tiempo cuando se comparan los valores de NDVI de CC-rastrajo incorporado y CP-rastrajo retenido donde se encontró que los valores de NDVI más bajos son para camas convencionales ($P < 0.05$). La mayoría de los estudios realizados (Govaerts et al. 2009c, Verhulst et al. 2009b, Riley 1998, Raimbault y Vyn 1991, Vyn y Raimbault 1993) sobre efecto que tiene la labranza en el desarrollo del cultivo, resulta en un desarrollo más rápido para camas con labranza convencional comparado con labranza cero; esto es debido a que la labranza moviliza los

nutrientes en el suelo y están disponibles de una manera más rápida para el cultivo. Sin embargo McMaster et al. (2002) reportan emergencia de la planta más rápido y más uniforme en labranza cero comparada con labranza convencional en seis años de estudio, debido a niveles más favorables de humedad a nivel de la siembra en labranza cero.

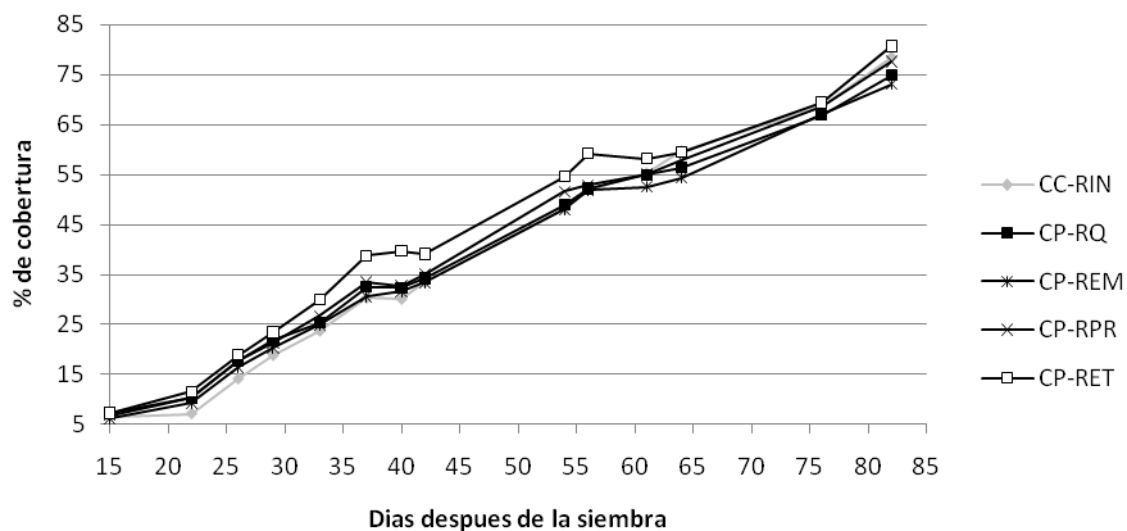
4.1.2.2 Cobertura del suelo por el follaje. La cobertura del suelo por el follaje se presenta de la Figura 13 a la Figura 15. Se observa diferencia entre los tratamientos cuando se tienen 0 kg de N/ha ($P < 0.05$), con un mayor porcentaje de cobertura del suelo por el follaje cuando se utiliza CP-rastrojo retenido y CP-rastrojo removido, en comparación con CC-rastrojo incorporado y CP-rastrojo quemado (Figura 13). Desde los 30 después de la siembra (inicio de brote) empieza a darse un aumento rápido de la cobertura del suelo por follaje en camas permanentes con rastrojo retenido y removido; alrededor del día 65 después de la siembra (emergencia de la espiga) aumenta la cobertura en CP-rastrojo parcialmente removido en comparación con CP-rastrojo retenido.



CC=camas convencionales, CP=camas permanentes, RIN=rastrojo incorporado, RQ= rastrojo quemado, REM= rastrojo removido, RPR= rastrojo parcialmente removido y RET= rastrojo retenido.

Figura 13. Efecto de los sistemas de labranza y manejo de rastrojo sobre la cobertura del suelo por el follaje durante el ciclo de cultivo de trigo con fertilización de 0 kg de N/ha.

Para el nivel de fertilización de 150 kg de N/ha (Figura 14) se observa una tendencia similar a la de 0 nitrógeno. Los valores significativamente más altos ($P < 0.05$) se obtienen al utilizar el sistema de CP-rastrojo retenido a lo largo de todo el ciclo de cultivo comparado con CC-rastrojo incorporado, CP-rastrojo quemado y CP-rastrojo removido.

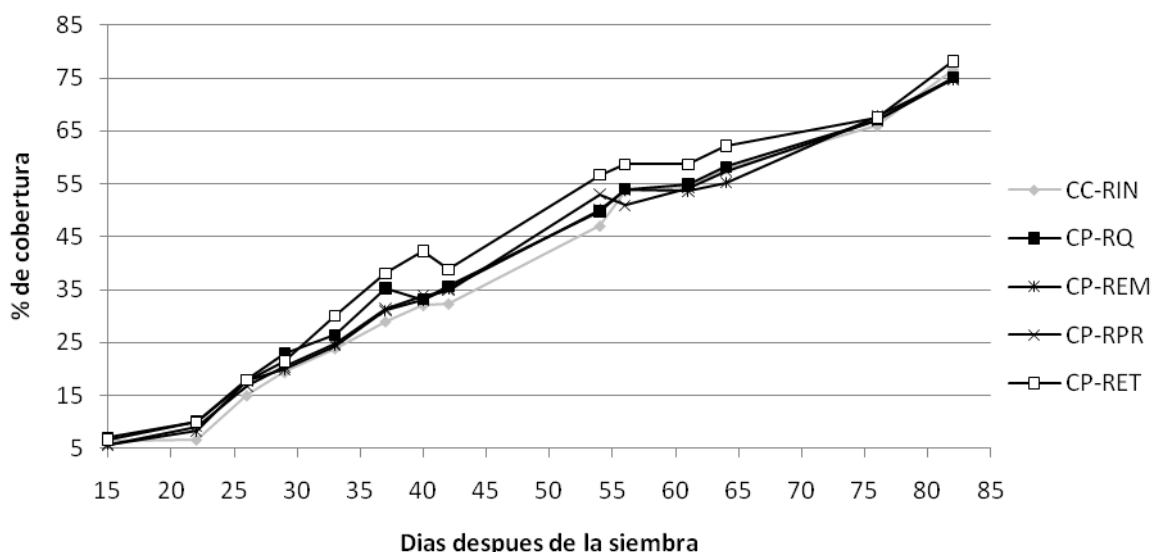


CC=camas convencionales, CP=camas permanentes, RIN=rastrojo incorporado, RQ= rastrojo quemado, REM= rastrojo removido, RPR= rastrojo parcialmente removido y RET= rastrojo retenido.

Figura 14. Efecto de los sistemas de labranza y manejo de rastrojo sobre la cobertura del suelo por el follaje durante el ciclo de cultivo de trigo con fertilización de 150 kg de N/ha.

Para el nivel de fertilización de 300 kg de N/ha (Figura 15) los valores significativamente más altos ($P < 0.05$) se obtienen al utilizar el sistema de CP-rastrojo a lo largo de todo el ciclo de cultivo comparado con los demás

tratamientos.



CC=camas convencionales, CP=camas permanentes, RIN=rastrojo incorporado, RQ= rastrojo quemado, REM= rastrojo removido, RPR= rastrojo parcialmente removido y RET= rastrojo retenido.

Figura 15. Efecto de los sistemas de labranza y manejo de rastrojo sobre la cobertura del suelo por el follaje durante el ciclo de cultivo de trigo con fertilización de 300 kg de N/ha.

En todos los niveles de fertilización se tiene un comportamiento similar de cobertura en los diferentes tratamiento de labranza-rastrojo. Cuando no se fertiliza el cultivo de trigo solo alcanza una cobertura máxima de alrededor de 60% para los tratamientos con menor cobertura (CC-rastrojo incorporado y CP-rastrojo quemado) y 70% para los de mayor cobertura (CP-rastrojo removido, parcialmente removido y retenido), mientras los manejos con 150 kg N/ha llega a un máximo de cobertura entre 75% (CC-rastrojo incorporado y CP-rastrojo quemado) y 80% (CP-rastrojo removido, parcialmente removido y retenido) y los manejos con 300 kg N/ha a un máximo de cobertura de 75% para todos los tratamientos.

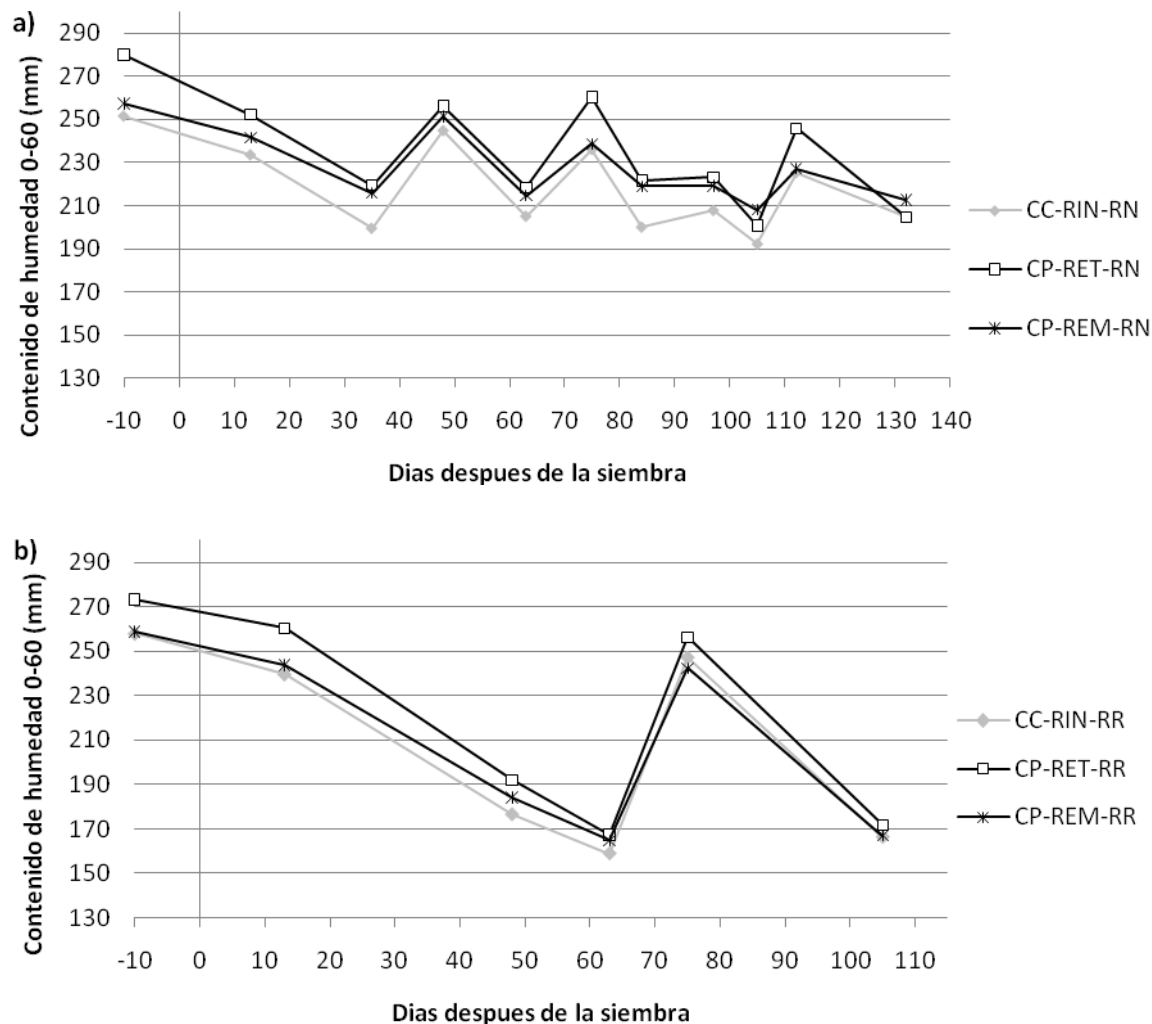
4.2 Ensayo para evaluar la resistencia a los efectos del cambio climático

4.2.1 Parámetros de medición de suelo

4.2.1.1 Contenido de humedad del suelo. El contenido de humedad de suelo en el perfil de 0 a 60 cm se muestra para los diferentes tratamientos y manejo de nitrógeno en las Figuras 16 a18. En la figura 16a cuando no se realiza fertilización nitrogenada se muestran los valores del contenido de humedad para riego normal y en la grafica 16b para riego reducido, en donde bajo ningún manejo de riego existen diferencias significativas entre los tratamientos a lo largo de todo el ciclo de cultivo ($P<0.05$).

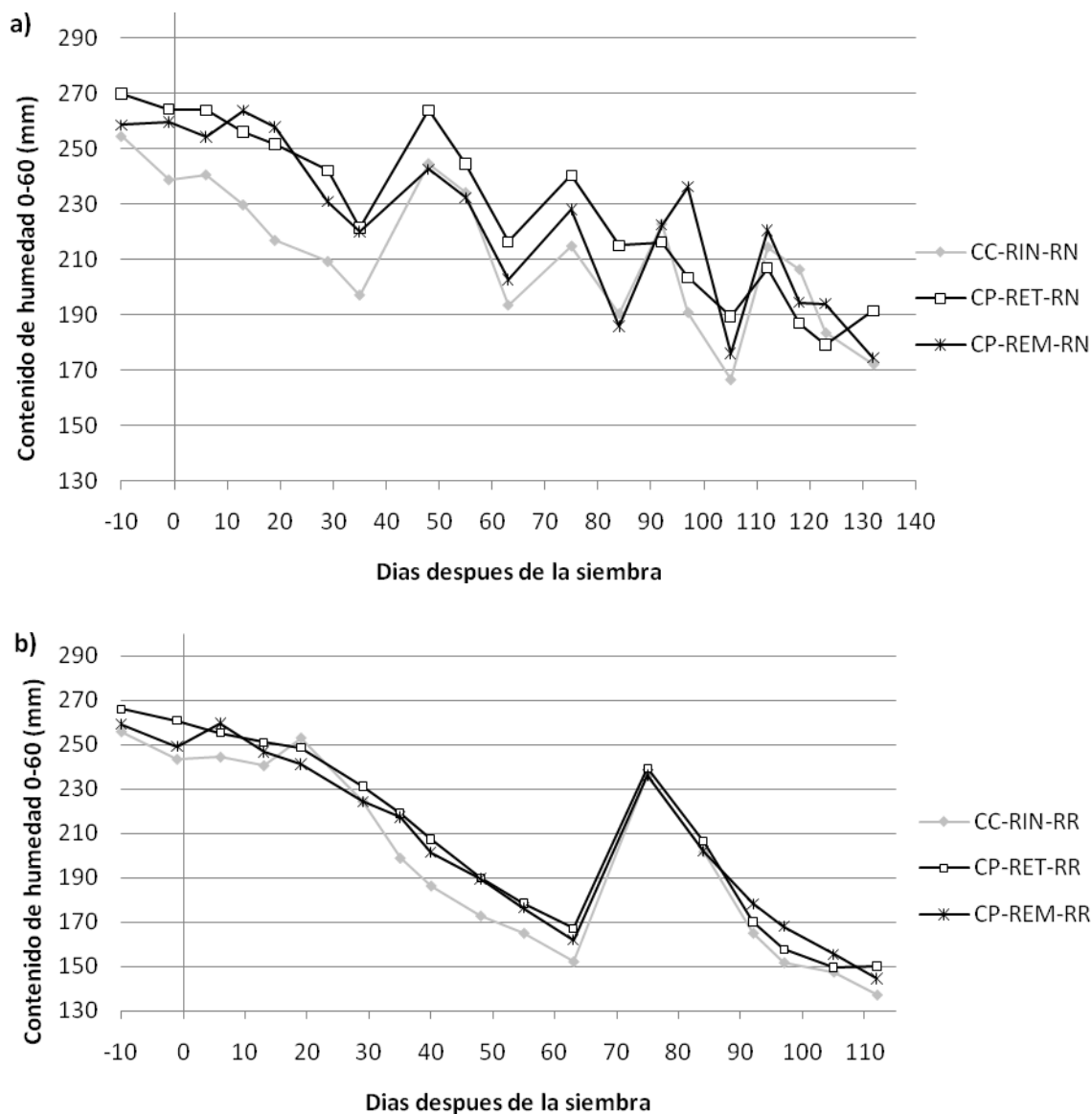
La figura 17a se muestran los valores de humedad de suelo durante el ciclo de cultivo de trigo bajo riego normal y un manejo de nitrógeno de 76 kg/ha antes del riego de presembrado y 38 kg/ha en el estado de primer nudo. Se encontró en los resultados que solo existe diferencia significativa entre los valores de humedad de CP-residuos retenidos y CC-residuos incorporados, con valores mayores para CP-residuos retenidos a lo largo de todo el ciclo de cultivo ($P<0.05$). La figura 17b muestra el contenido de humedad de suelo para los tres tratamientos bajo riego reducido (sequía) con el mismo manejo de nitrógeno antes mencionado. Bajo sequía hay diferencia significativa entre los tratamientos con mayor contenido de

humedad de suelo en todo el ciclo de cultivo para CP-residuos retenidos o removidos comparado con CC-residuos incorporados ($P < 0.05$).



CC= Camas convencionales, CP= Camas permanentes, RIN= Residuos incorporados, RET= Residuos retenidos, REM= Parte de los residuos removidos, RN= Riego normal y RR= riego reducido.

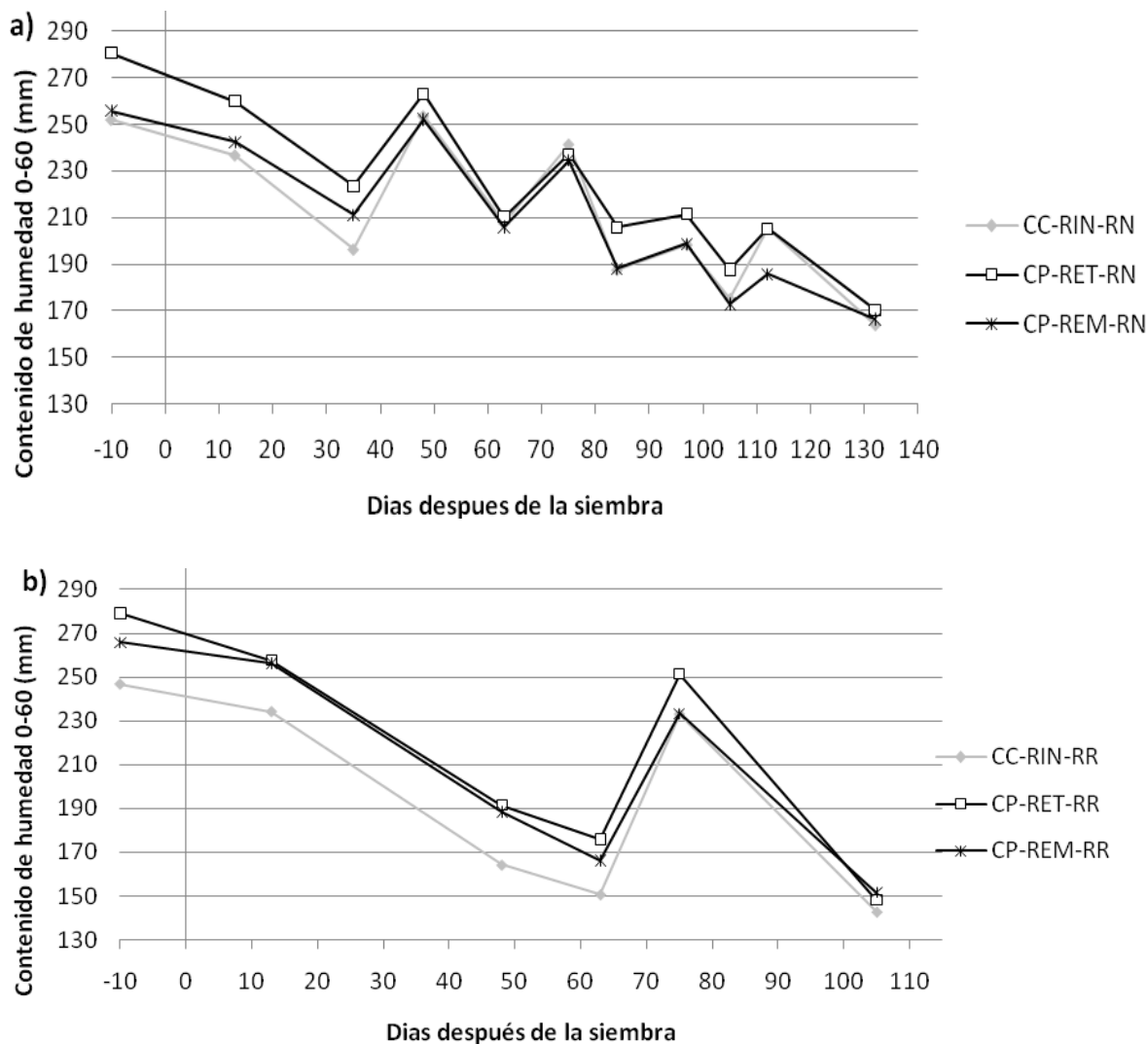
Figura 16. El efecto del manejo de labranza y residuos sobre el contenido de humedad en el perfil (0-60 cm) a través de todo el ciclo de cultivo de trigo con 0 Nitrógeno bajo (a) riego normal (riego a los 21 días antes de la siembra y 39, 65, 85 y 106 días después de la siembra) y (b) riego reducido (riego 21 días antes de la siembra y 65 días después de la siembra)



CC= Camas convencionales, CP= Camas permanentes, RIN= Residuos incorporados, RET= Residuos retenidos, REM= Parte de los residuos removidos, RN= Riego normal y RR= riego reducido.

Figura 17. El efecto del manejo de labranza y residuos sobre el contenido de humedad en el perfil (0-60 cm) a través de todo el ciclo de cultivo de trigo con 76 kg N/ha antes del riego de presiembra y 38 kg N/ha en el estado de primer nudo bajo (a) riego normal (riego a los 21 días antes de la siembra y 39, 65, 85 y 106 días después de la siembra) y (b) riego reducido (riego 21 días antes de la siembra y 65 días después de la siembra).

En la figura 18a se muestra el contenido de humedad en el suelo bajo riego normal y en la figura 18b para riego reducido, cuando se fertiliza el trigo con 152 kg N/ha antes del riego de presiembra y 76 kg N/ha en el estado de 1er nudo en ambos casos. Bajo riego normal no existen diferencias significativas entre los tratamientos a lo largo de todo el ciclo de cultivo ($P < 0.05$). Bajo condiciones de riego reducido (sequía) se observa un mayor contenido de humedad en las camas permanentes reteniendo todos los residuos o removiendo parte de los residuos, comparado con las camas convencionales incorporando los residuos al suelo durante todo el ciclo de cultivo ($P < 0.05$).



CC= Camas convencionales, CP= Camas permanentes, RIN= Residuos incorporados, RET= Residuos retenidos, REM= Parte de los residuos removidos, RN= Riego normal y RR= riego reducido.

Figura 18. El efecto del manejo de labranza y residuos sobre el contenido de humedad en el perfil (0-60 cm) a través de todo el ciclo de cultivo de trigo con 152 kg N/ha basal y 76 kg N/ha en el estado de 1er nudo bajo (a) riego normal (riego a los 21 días antes de la siembra y 39, 65, 85 y 106 días después de la siembra) y (b) riego reducido (riego 21 días antes de la siembra y 65 días después de la siembra).

Los resultados de humedad de suelo muestran que al manejar el cultivo con riego normal no existe diferencia entre los tratamientos a lo largo del ciclo de cultivo, solo en el segundo caso de fertilización (76 kg N/ha antes del riego de presembrado y 38 kg N/ha en el estado de primer nudo). Pero al someter al cultivo a un estado de sequía hay un mayor contenido de humedad en camas permanentes con cualquier manejo de residuos comparado con CC-residuos incorporados ($P < 0.05$). Esta diferencia es aun más marcada en el período de tiempo transcurrido entre el riego de presembrado y el riego de auxilio. Esto significa que cuando el suelo no tiene suministro de agua (condiciones de sequía) y el requerimiento de agua del cultivo va en aumento, se puede notar el efecto del tipo de labranza sobre la capacidad del suelo para retener humedad. Camas permanentes con retención de (parte de) los residuos tienen mayor estabilidad de agregados comparado con camas convencionales (Limón-Ortega et al., 2006), resultando en una mejor infiltración del agua (Hawkins G. et al., 2007). Uribe y Rouanet (2002) compararon la humedad de suelo en 3 diferentes sistemas de la branza y manejo de residuos; labranza convencional, labranza cero con retención de residuos y cero labranza con quema de residuos. Encontraron que en camas con labranza cero y retención de residuos los niveles de humedad en la zona superficial, hasta los 40 cm de profundidad, fueron altos en relación con la técnica de labranza convencional, justo en zonas donde se encuentra una gran proporción del sistema radicular del cultivo. Govaerts et al. (2009c) mencionan que el efecto positivo que tiene la cobertura del suelo por los residuos del cultivo anterior sobre el contenido de humedad del suelo, se vuelve más claro en situaciones de sequía; lo cual es comprobado por este estudio.

El tiempo de encharcamiento es una medida de la infiltración directa en el suelo. Govaerts et al. (2009b) encontraron que en condiciones de riego, el tiempo de saturación se incrementa con el incremento de la retención del residuo en la

superficie del suelo. La quema de los residuos resulta en una menor infiltración directa. La retención de los residuos en la superficie previene la formación de costras al incrementar la estabilidad de los agregados comparado con cero labranza con remoción o quema de los residuos (Li et al. 2007; Chan et al. 2002). Además, los residuos dejados en la parte superior del suelo con cero labranza y retención de residuos actúan como una sucesión de barreras, reduciendo la velocidad del escurrimiento y dando oportunidad al agua de más tiempo para infiltrarse (Verhulst et al., 2009a).

4.2.2 Desarrollo del cultivo durante el ciclo de cultivo

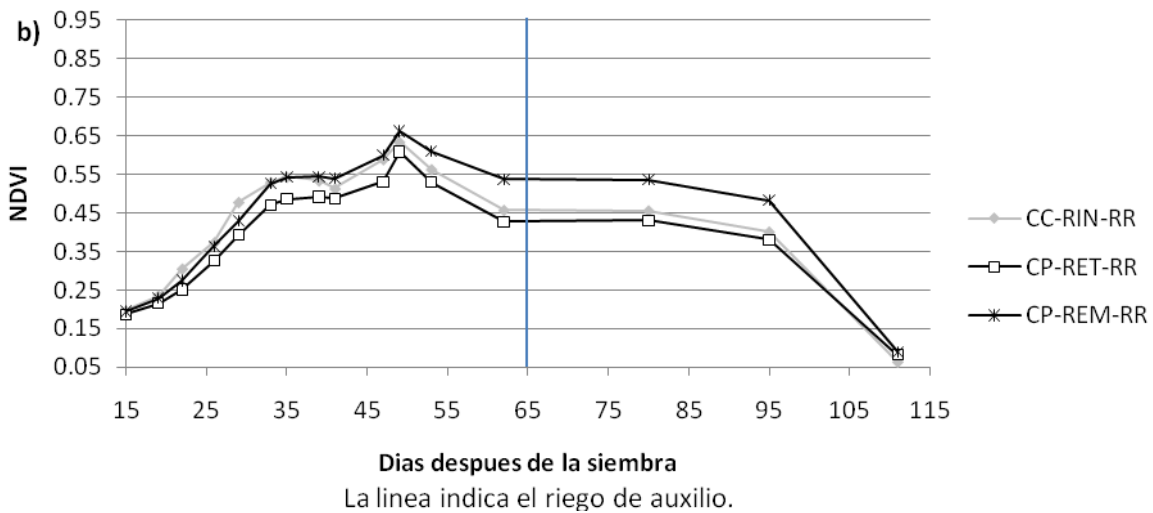
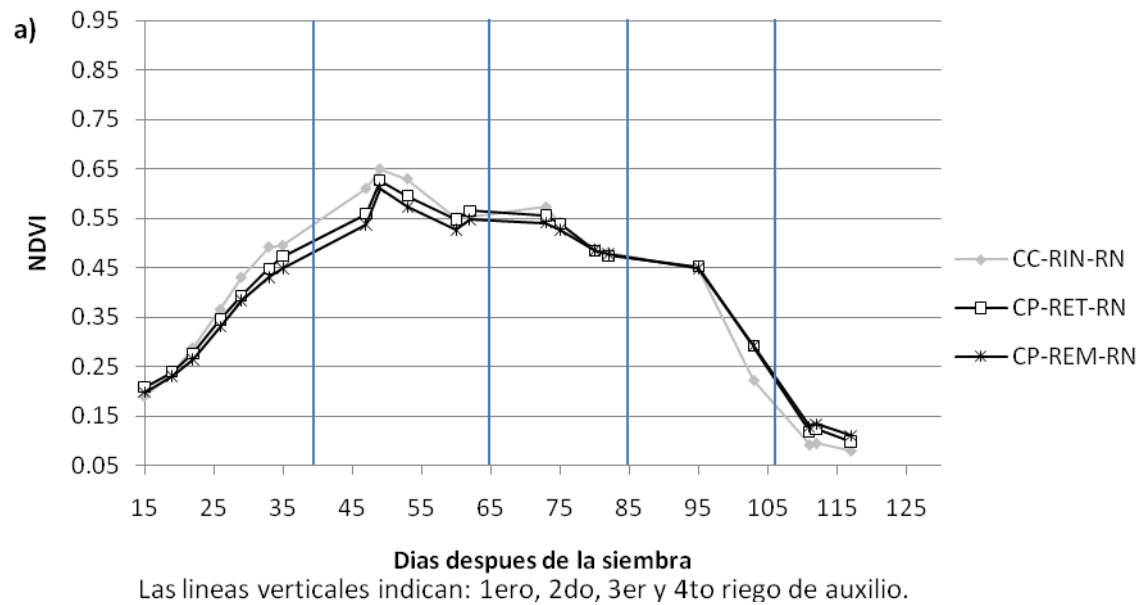
4.2.2.1 Diferencia Normalizada del Índice Vegetativo (NDVI). Estudios realizados sobre la influencia de la preparación del suelo para la siembra, muestran que la labranza facilitó la movilización de nutrientes para el desarrollo inicial del cultivo. Pero más tarde en el ciclo de cultivo empieza una disminución rápida del NDVI, que implica un tiempo menor de acumulación de biomasa (Verhulst, 2009b).

Los valores de NDVI del cultivo bajo riego normal y no fertilización se muestran en la figura 19a donde no hay diferencia significativa entre los tratamientos en el periodo de crecimiento (15 a 49 días después de la siembra) y tampoco en el periodo estable del cultivo (53 a 95 días después de la siembra) ($P < 0.05$). Al final del ciclo de cultivo durante la etapa de formación y llenado de grano los valores de

NDVI son significativamente más altos en camas permanentes con residuos retenidos o removidos comparados con camas convencionales incorporando los residuos ($P < 0.05$).

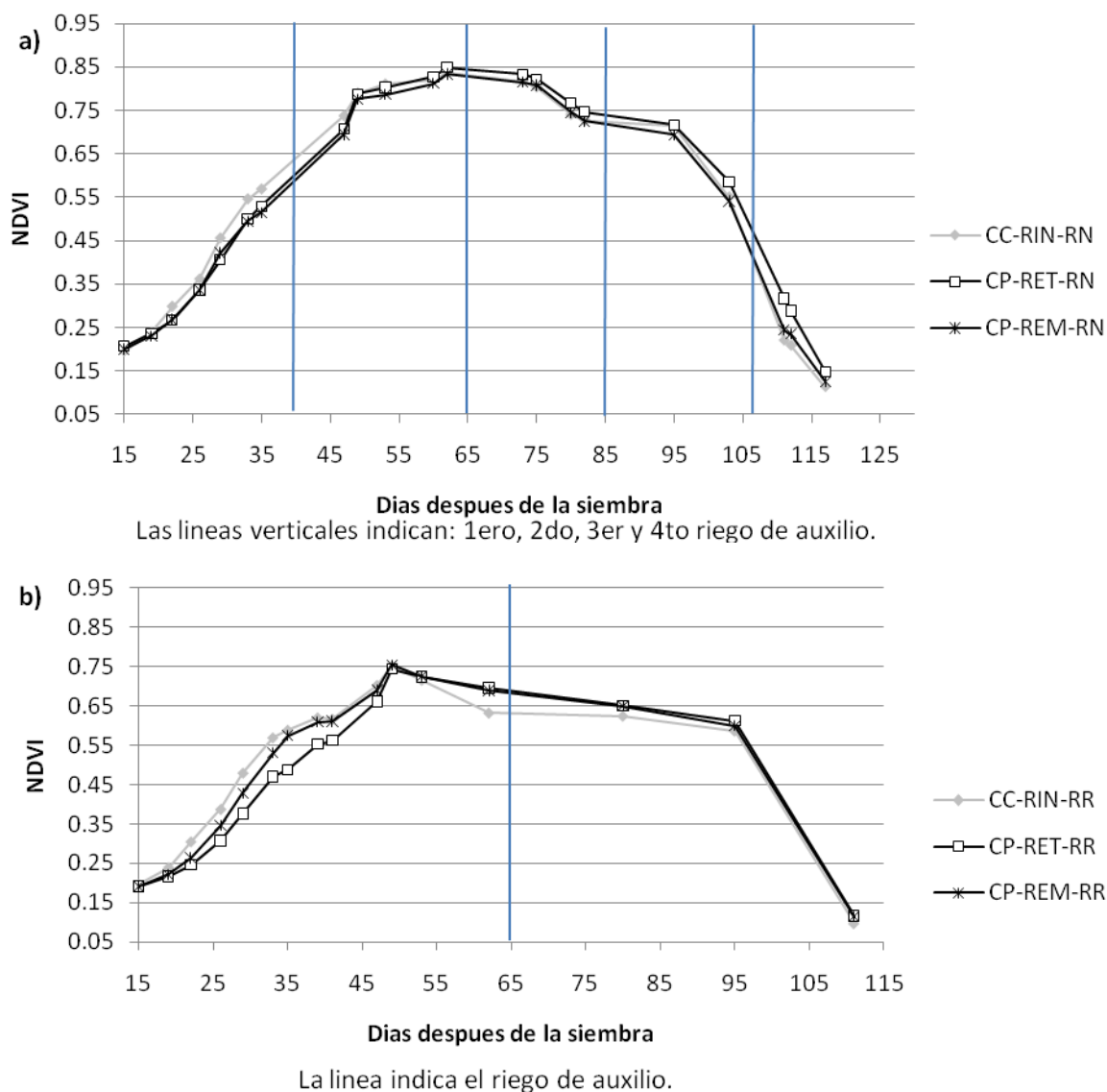
Bajo riego reducido (Figura 19b) en el inicio del ciclo de cultivo no se observan claras diferencias entre los tratamientos. Más tarde en el ciclo (53 a 95 días después de la siembra) se observan valores de NDVI mayores para CP-residuos removidos comparados con CP-residuos retenidos y CC-residuos incorporados; sin embargo no existe diferencia significativa entre los tratamientos ($P < 0.05$).

Los valores de NDVI cuando el cultivo es manejado con 76 kg N/ha antes del riego de presembrado y 38 kg N/ha en el estado de primer nudo, son mostrados en la figura 20 bajo riego normal (a) y bajo riego reducido (b). No se encontró diferencia significativa alguna entre los tratamientos ($P < 0.05$). Sin embargo en ambos manejos de riego se tiene el mismo comportamiento que se ha venido observando: las camas permanentes tienen valores un poco menores a las camas convencionales al inicio de la temporada (desde 15 a 49 días después de la siembra) pero al final del ciclo de cultivo desde las etapas críticas de emergencia de espiga hasta llenado de grano (65 días después de la siembra hasta el final del ciclo) los valores en camas permanentes son mayores que en camas convencionales bajo riego normal y reducido.



CC= Camas convencionales, CP= Camas permanentes, RIN= Residuos incorporados, RET= Residuos retenidos, REM= Parte de los residuos removidos, RN= Riego normal y RR= riego reducido.

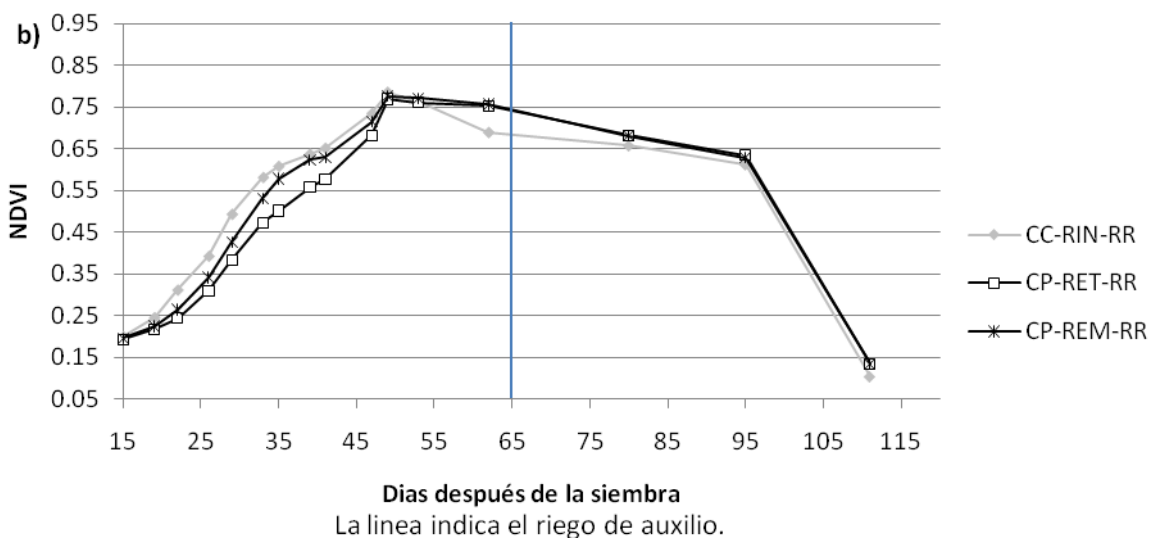
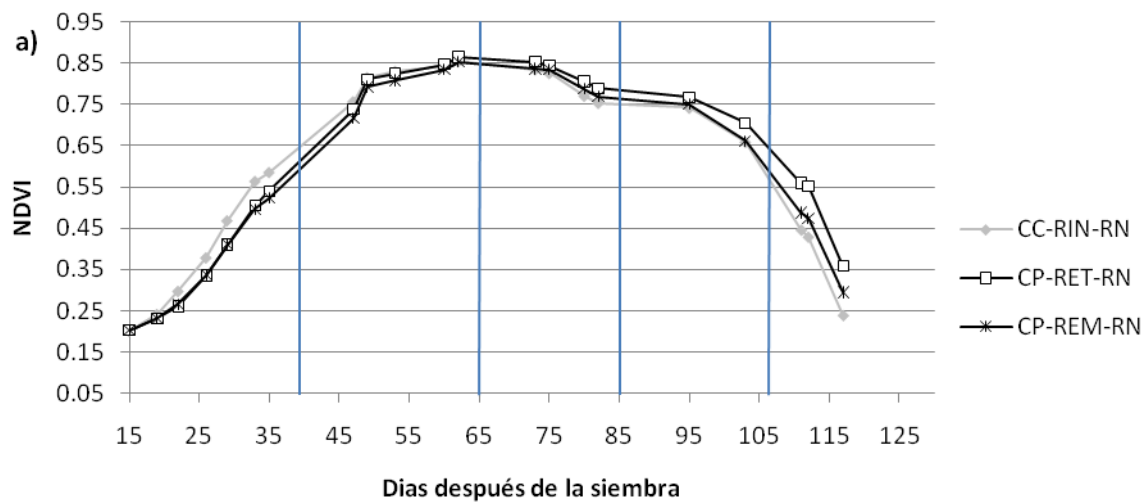
Figura 19. Efecto de los sistemas de labranza y manejo de residuos sobre el NDVI durante el ciclo de cultivo de trigo con 0 nitrógeno bajo a) riego normal y b) riego reducido (sequía).



CC= Camas convencionales, CP= Camas permanentes, RIN= Residuos incorporados, RET= Residuos retenidos, REM= Parte de los residuos removidos, RN= Riego normal y RR= riego reducido.

Figura 20. Efecto de los sistemas de labranza y manejo de residuos sobre el NDVI durante el ciclo de cultivo de trigo a con 76 kg N/ha antes del riego de presiembra y 38 kg N/ha en el estado de primer nudo bajo a) riego normal y b) riego reducido (sequía).

Cuando se fertiliza el trigo con 152 kg N/ha basal y 76 kg N/ha en el estado de 1er nudo, se observa el mismo comportamiento antes mencionado para la segunda forma de fertilización. No existe diferencia significativa entre los tratamientos en ninguna etapa del ciclo de cultivo cuando se maneja el cultivo bajo riego normal (Figura 21). Al someter al cultivo a la condición de sequia se observa diferencia significativa al inicio del cultivo (15 a 49 días después de la siembra) con valores mayores para CC-residuos incorporados comparados con CP- residuos retenidos ($P < 0.05$).

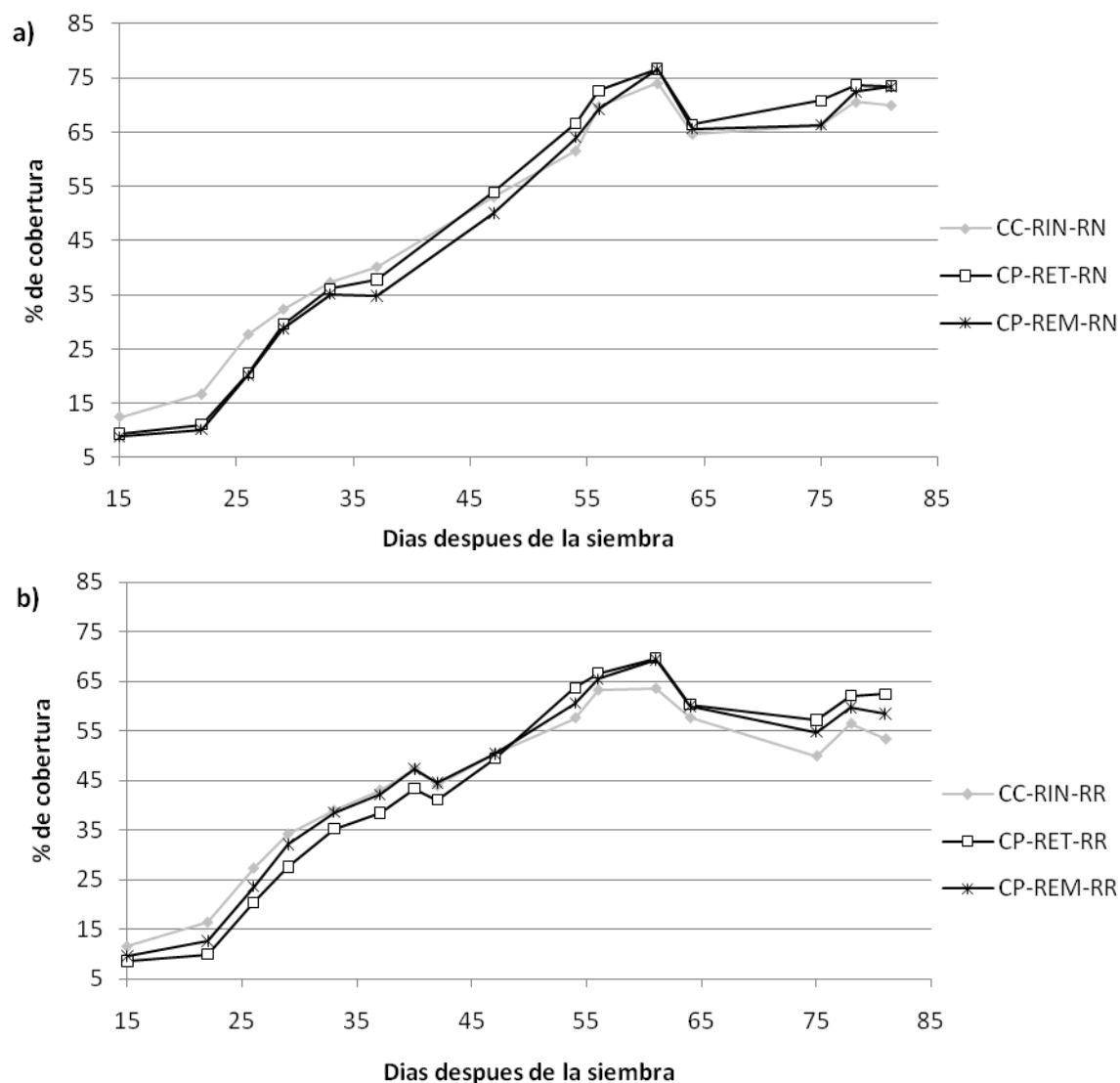


CC= Camas convencionales, CP= Camas permanentes, RIN= Residuos incorporados, RET= Residuos retenidos, REM= Parte de los residuos removidos, RN= Riego normal y RR= riego reducido.

Figura 21. Efecto de los sistemas de labranza y manejo de residuos sobre el NDVI durante el ciclo de cultivo de trigo con 152 kg N/ha antes del riego de presiembra y 76 kg N/ha en el estado de primer nudo bajo a) riego normal y b) riego reducido (sequía).

Tanto en riego normal como en riego reducido, los valores de NDVI son más altos al principio del ciclo de cultivo (desde 15 hasta 47 días después de la siembra) para los tratamientos con camas convencionales incorporando el rastrojo, comparado con camas permanentes dejando o quitando parte de los residuos. Bajo riego normal, más tarde en el ciclo de cultivo durante la formación de grano (desde los 80 días después de la siembra) los valores de NDVI son más altos cuando se siembra en camas permanentes reteniendo los residuos. Bajo riego reducido, se observa algo interesante (Figuras 19b, 20b y 21b): el cultivo en camas convencionales con residuos incorporados después de alcanzar su máximo valor de NDVI (49 días después de la siembra) se observa que empieza a bajar más rápidamente comparado con los otros tratamientos; sin embargo al recibir el riego de auxilio (65 días después de la siembra) empieza a subir un poco pero de manera muy lenta. El comportamiento anteriormente descrito no sucede en camas permanentes lo cual puede ser un indicador de un desarrollo más equilibrado cuando el cultivo es sometido a estrés hídrico. Los estudios sobre el desarrollo del cultivo afectado por labranza y manejo de residuos son pocos pero algunos reportes coinciden con los resultados encontrados. De manera general Riley (1998) reporta que el desarrollo de los cereales de verano es tardado con labranza reducida, pero se compensa al final de la temporada. Govaerts et al. (2009c) también reporta el mismo comportamiento para el cultivo de trigo bajo cero labranza. Se ha encontrado una menor intensidad de mineralización de nitrógeno y menor nitrógeno en forma de nitratos disponibles para el cultivo cuando se maneja con cero labranza (Silgram y Shepherd, 1999; Malhi et al., 2001). Mas que la retención de los residuos del cultivo anterior en el suelo, la combinación de la retención de los residuos y la labranza induce un cambio en el ciclo del nitrógeno y así como el tiempo de liberación de N (Govaerts et al., 2006). Este cambio en el ciclo del nitrógeno podría explicar en parte por que las curvas de NDVI para labranza convencional avanzan o aumentan más rápidamente en comparación con los tratamientos con camas permanentes.

4.2.2.2 Cobertura del suelo por el follaje. La cobertura del suelo por el follaje no presenta diferencias significativas bajo riego normal (Figura 22a), así como tampoco bajo riego reducido (Figura 22b) a lo largo de todo el ciclo de cultivo cuando se maneja con 76 kg N/ha antes del riego de presembrado y 38 kg N/ha en el estado de primer nudo. Se observa ligeramente mayor cobertura para CC-residuos incorporados desde el inicio del ciclo hasta 47 días después de la siembra para riego normal, después de ese periodo de tiempo hasta el 61 días después de la siembra, el porcentaje de cobertura empieza igualarse a CP-residuos removidos. Se tiene un comportamiento más uniforme para el porcentaje de cobertura en CP-residuos retenidos desde el inicio hasta el final del ciclo comparado con los demás tratamientos (Figura 22a). El mismo comportamiento se puede observar en el inicio del cultivo bajo riego reducido (Figura 22b), pero con una diferencia aun más notoria entre los tratamientos desde 47 hasta 81 días después de la siembra con valores menores para CC-residuos incorporados comparados con camas permanentes reteniendo o removiendo los residuos; sin embargo la diferencia no es significativa ($P < 0.05$). Este comportamiento coincide con el de los valores de NDVI (Figura 20) en este periodo de tiempo y bajo este manejo de nitrógeno. Varios autores (Govaerts et al. 2009c; Scotford y Miller 2004; Mandal et al. 2003) coinciden en que los valores de NDVI aumentan cuando el follaje del cultivo empieza a cerrar y empiezan a decrecer o disminuir cuando el cultivo entra en etapa de madurez. El mismo comportamiento es encontrado en este estudio.



CC= Camas convencionales, CP= Camas permanentes, RIN= Residuos incorporados, RET= Residuos retenidos, REM= Parte de los residuos removidos, RN= Riego normal y RR= riego reducido.

Figura 22. Efecto de los sistemas de labranza y manejo de residuos sobre la cobertura del follaje durante el ciclo de cultivo de trigo a con 76 kg N/ha antes del riego de presembrado y 38 kg N/ha en el estado de primer nudo bajo a) riego normal y b) riego reducido (sequía).

V. CONCLUSIONES

5.1 Ensayo de sustentabilidad a largo plazo

La erosión del suelo provocada por el agua de riego, medida como la concentración de suelo en el agua de salida de la parcela, fue significativamente mayor en camas de labranza convencional que en camas permanentes reteniendo o quemando los residuos al inicio de la temporada (riego de presembrado y 1er y 2do riego de auxilio). Al final de la temporada (3er y 4to riego de auxilio) la erosión del suelo fue similar en todos los tratamientos. Esto implica que bajo el sistema de camas permanentes se tiene una mayor resistencia del suelo a la erosión causada por el agua de riego y hay una mayor susceptibilidad del sistema convencional al

efecto desgastante del agua. Agricultura de conservación puede ser una alternativa eficaz para reducir la erosión y así evitar la disminución de la fertilidad y la capacidad de almacenamiento del agua en suelo a largo plazo.

En tratamientos sin fertilización de nitrógeno, el contenido de humedad de suelo fue más alto en camas convencionales con rastrojo incorporado comparado con camas permanentes quemando el rastrojo o removiéndolo parcialmente. Las camas permanentes con rastrojo retenido en la superficie muestran mayor contenido de humedad comparado con las camas permanentes con cualquier otro manejo de residuos. Bajo condiciones de fertilización nitrogenada no se observa diferencia en el contenido de humedad de suelo entre los. Tal vez el factor limitante del nitrógeno hace que sean más marcadas las diferencias entre los diferentes sistemas.

Los valores de NDVI en tratamientos sin fertilización de nitrógeno son más altos bajo el manejo de camas permanentes reteniendo el rastrojo, removiéndolo o removiéndolo parcialmente, comparados con las camas permanentes donde se quema el rastrojo. Al tener fertilización en el cultivo, al final del ciclo (113-130 días después de la siembra) se tienen valores más altos de NDVI en camas permanentes con rastrojo retenido comparado con los demás manejos de residuos en camas permanentes, sin embargo los valores de NDVI son más altos para camas convencionales con el rastrojo incorporado comparado con cualquier manejo de residuos con camas permanentes en el mismo periodo de tiempo. La diferencia más marcada a lo largo de todo el ciclo de cultivo cuando el suelo no se fertiliza con nitrógeno puede indicar que el sistemas de camas permanentes donde no se queman los residuos hace que el sistema sea más resistente o se adapte mejor a la deficiencia o escasez de este elemento. Un crecimiento o nacencia más lenta para las camas convencionales con rastrojo incorporado comparado con

camas permanentes fue encontrada en este ensayo en particular, esto puede ser debido al movimiento del suelo al momento de la siembra. Lo anterior implica que la labranza afecta de manera directa el desarrollo del cultivo-.

Se tiene una mayor cobertura de suelo por el follaje al utilizar camas permanentes con todo el rastrojo retenido en la superficie comparado con cualquier otro manejo de labranza-residuo y bajo cualquier manejo de nitrógeno. Esto tiene un impacto positivo en el cultivo, porque tiene mayor capacidad fotosintética.

5.2 Ensayo para evaluar la resistencia a los efectos del cambio climático

Bajo riego normal, hay más humedad en el suelo en camas permanentes con retención de residuos en la superficie que quitándolos o incorporándolos al suelo en las camas convencionales durante la mayor parte de la temporada. Bajo condiciones de riego reducido (sequía), se observa un mayor contenido de humedad en el perfil en camas permanentes reteniendo (parte de) los residuos, comparado con las camas convencionales incorporando los residuos. Las diferencias en la cantidad de agua disponible para la planta están reflejadas en el crecimiento del cultivo de trigo. Durante la formación de grano, los valores de NDVI son más altos cuando se siembra en camas permanentes reteniendo los residuos que en camas convencionales o en camas permanentes removiendo parte de los residuos bajo riego normal. Bajo riego reducido, el NDVI es más alto en camas permanentes en durante la formación de grano que en camas

convencionales. La cobertura del suelo por el follaje es similar en todos los tratamientos, bajo riego normal y riego reducido.

La implementación de agricultura de conservación con camas permanentes y retención de (parte de) los residuos resulta en un sistema que es más resistente a condiciones de sequía que el sistema convencional que incluye labranza. La agricultura de conservación puede ser una alternativa sustentable para el agricultor.

VI. LITERATURA CITADA

Álvarez, R. y H.S. Steinbach. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. **Soil and tillage research**. 2645: 15 pp.

Aquino, P. 1998. The adoption of bed planting of wheat in de Yaqui Valley, Sonora, Mexico. **Wheat program special report No. 17A**. Mexico, D.F.: CIMMYT.

Ayodele, E. A. y A. O. Ayorinde. 2004. Evaluation of Two Temperature Stress Indices to Estimate Grain Sorghum Yield and Evapotranspiration. **Agronomy Journal**. 96:1282–1287

Beare, M.H., Hendrix, P.F., and Coleman, D.C. 1994. Water-Stable Aggregates and Organic-Matter Fractions in Conventional-Tillage and No-Tillage Soils. **Soil Science Society of American Journals**. 58:777-786.

Ben-Hammouda, M., K. M'Hedhbi, L. Abidi, A. Rajeh, H. Chourabi, J. El- Faleh, C. Dichiara. 2008. Conservation Agriculture Based on Direct Sowing. In: The future of drylands. Lee C. y T. Schaaf (eds). Editorial Springer. 647-657 pp.

Benites, J. y A. Castellanos. 2003. Mejorando la humedad del suelo con agricultura de conservación. **LEISA revista de agroecología**. 19: 5 - 6.

Betancourt, P. 2004. La erosión hídrica de los suelos bajo explotación agropecuaria. Centro de investigaciones agropecuarias del estado de Lara. Barquisimeto, estado de Lara, Venezuela.

Blevins, R.L., Cook, D., Phillips, S.H., and Phillips, R.E. 1971. Influence of No-Tillage on Soil Moisture. **Agronomy Journal**. 63:593-&.

Blevins, R.L., Thomas, G.W., and Cornelius, P.L. 1977. Influence of No-Tillage and Nitrogen-Fertilization on Certain Soil Properties After 5 Years of Continuous Corn. **Agronomy Journal**. 69:383-386.

Brown, M.J. 1985. Effect of Grain Straw and Furrow Irrigation Stream Size on Soil Erosion and Infiltration. **Journal of Soil and Water Conservation**. 40: 389-391.

Byerlee, D. y Moya, P., 1993. Impacts of international wheat breeding research in the developing world. CIMMYT, México D.F., México.

Castañeda, C., C. López, J. Molina, B. Colina, A. Livera. 2004. Crecimiento y desarrollo de cebada y trigo. **Revista fitotecnia mexicana**. 27: 167-175

Chan K. Y., D.P. Heenan and A. Oates, Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. **Soil and Tillage research**. (63), pp. 133–139.

CIMMYT. 2006. CIMMYT annual report 2005-2006. **CIMMYT**. México, D.F., México, 28 pp.

CIMMYT, 2007. La labranza cero gana adeptos entre los productores de trigo de invierno en Turquía. **CIMMYT E-Boletín. No. 4.** (Ver. <http://www.cimmyt.org/spanish/wps/news/2007/aug/Turkey.htm>)

CIMMYT. 2008. Agricultores de la India y Pakistán cosechan los beneficios de la cero labranza. **CIMMYT E-Boletín. No. 5.** (Ver. <http://www.cimmyt.org/spanish/wps/news/2008/jan/indiaPakistan.htm>)

CNA, Servicio Meteorológico Nacional (Ver <http://smn.cna.gob.mx/>) (Accedido Marzo 12, 2009)

Dalal, R.C. 1989. Long-Term Effects of No-Tillage, Crop Residue, and Nitrogen Application on Properties of a Vertisol. **Soil Science Society of America Journal**. 53: 1511 - 1515.

Díaz T., N. Pérez., A. López., L. Partidas R., Y. Suárez. 2008. Manejo sostenible del agua en zonas semiáridas: evaluación de dos técnicas de riego y fertilización nitrogenada en Sinaloa, México. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, Vol. 17, No. 1.

Ekboir, J. 2002. *CIMMYT 2000-2001 World Wheat Overview and Outlook: Developing No-Till Packages for Small-Scale Farmers*. Mexico, DF: CIMMYT.

FAO, 1997. La agricultura y los cambios climáticos: la función de la FAO. (Ver. <http://www.fao.org/Noticias/1997/971201-s.htm>)

FAO, 2000. AQUASTAT - Sistema de Información sobre el Uso del Agua en la Agricultura de la FAO. (Ver. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries/mexico/indexesp.stm>)

FAO. 2002a. Agricultura de conservación: Estudio de casos en América latina y Africa. **Boletín de suelos de la FAO**. No. 78. (Ver. <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/sb78s.pdf>)

FAO, 2002b. El agua y la Agricultura. (Ver. <http://www.fao.org/WorldFoodSummit/sideevents/papers/Y6899S.htm> (Accedido Abril 16, 2009))

FAO. 2003. Unlocking the Water Potential of Agriculture. **FAO**. Roma, Italia. pp. 70. (Ver. <http://www.fao.org/docrep/006/Y4525E/Y4525E00.HTM>)

FAO. 2008. ¿Qué es la agricultura de conservación? (Ver. <Http://www.fao.org/ag/ca/es/1a.html>)

Fernández-Gómez, L. Mateos y J. V. Giráldez, 2004. Furrow irrigation erosion and management. **Irrigation science**. 23: 123–131

González J. E. 2005. Erosión: la importancia de la conservación del suelo. **Asociación Española Agricultura de Conservación / Suelos Vivos (AEAC/SV)**

Govaerts, B., K. D. Sayre, J. M., Ceballos-Ramírez, M. L., Luna –Guido, A., Limón-Ortega, J., Deckers, J., Dendooven. 2006. Conventionally tilled and permanent raised beds with different crop residue management: Effects on soil C and N dynamics. **Plant soil**. 280, 143-155.

Govaerts, B., M. Fuentes, M. Mezzalama, M. J. Nicol, J. Deckers, Etchevers, Figueroa-Sandoval, K. D. Sayre. 2007a. Infiltration, soil moisture, root rot and nematode populations after 12 years of different tillage, residue and crop rotation managements. **Soil and Tillage Research**. 94: 209 - 219.

Govaerts, B., K.D. Sayre, K. Lichter, L. Dendooven, J. Deckers. 2007b. Influence of permanent raised bed planting and residue management on physical and chemical soil quality in rain fed maize/wheat systems. **Plant Soil**. 291:39-54.

Govaerts, B., K. D. Sayre, B. Goudeseune, P. De Corte, K. Lichter, L. Dendooven, J. Deckers. 2009a. Conservation agriculture as a sustainable option for the central Mexican highlands. **Soil & Tillage Research**. 103: 222–230

Govaerts, B., N. Verhulst, E. Verachtert, F. Kienle, A. Limon-Ortega, J. Mendoza, J. Deckers, D. Raes, K. D. Sayre. 2009b. La importancia del manejo de los residuos del cultivo para mantener la calidad del suelo en sistemas de cultivo con cero labranza; Una comparación entre ensayos a largo plazo en sistemas de cultivo de trigo de temporal y de riego.

Govaerts, B., N. Verhulst, K. D. Sayre, P. D. Corte, J. Crossa, J. Deckers. 2009c. Do crops grow different with different management? The influence of tillage, rotation and residue management on maize and wheat development evaluated with an optical sensor.

Hatfield, J.L., Sauer, T.S., Prueger, J.H., 2001. Managing soils to achieve greater water use efficiencies: a review. **Agronomy Journal**. 93, 271–280.

Hawkins, G. L., D. Sullivan y C. Truman. 2007. Water Savings Through Conservation Tillage. (Ver. <http://pubs.caes.uga.edu/caespubs/pubs/PDF/C916.pdf>)

Howard, M. y H. Gómez. 2001. Trigo regado. **FAO**. Roma, Italia. (Ver. <http://www.fao.org/docrep/006/x8234s/x8234s00.htm>).

Hulugalle, N.R., Lobry de Bruyn L.A., Entwistle, P.C., 1997a. Residual effects of tillage and crop rotation on soil properties, soil invertebrate numbers and nutrient uptake in an irrigated Vertisol sown to cotton. **Applied Soil Ecology**. 7, 11–30.

Hulugalle, N.R. y P.C. Entwistle. 1997b. Soil properties and crop growth in an irrigated Vertisol after nine years of minimum tillage. **Soil & Tillage Research**. 42: 15–32.

INIFAP. 2001. Guía técnica para los cultivos del área de influencia del campo experimental Valle del Yaqui. **Comité editorial CEVY**. 282 pp.

INIFAP, 2005. Innovaciones tecnológicas 2005. Para mejorar la competitividad y sostenibilidad de las cadenas agroalimentarias y agroindustriales. **Folleto técnico**. No. 3. (Ver http://www.inifap.gob.mx/temas_interes/innovaciones_tecnologicas2005web.pdf)

Kobata, T., J. Palta y N. Turner. 1992. Rate of Development of Postanthesis Water Deficits and Grain Filling of Spring Wheat. **Crop Science**. 32: 1238-1242.

Lal, R. 1994. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. **USDA-The Ohio State University**. SMSS Technical Monograph No. 21.

Lewis, R.B., E.A. Hiler y W.R. Jordan. 1974. Susceptibility of grain (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) sorghum to water deficit at three growth stages. **Agronomy Journal**. 66: 589–591.

Li, H.W., H.W. Gao, H.D. Wu, W.Y. Li, X.Y. Wang, J. He, 2007. Effects of 15 years of conservation tillage on soil structure and productivity of wheat cultivation in northern China. **Australian Journal of Soil Research**. 45, 344-350.

Limón-Ortega, A., Sayre, K. D., Francis, C. A., 2000. Wheat nitrogen use efficiency in a bed planting system in Northwest Mexico. **Agronomy Journal**. 92, 303–308.

Limón-Ortega, A., B. Govaerts, J. Deckers, K.D. Sayre. 2006. Soil aggregate and microbial biomass in a permanent bed wheat–maize planting system after 12 years. **Field Crops Research**. 97: 302 - 309.

Ma B.L. y D.L. Smith. 1992. Apical development of spring barley under field conditions in Northeastern North America. **Crop Science**. 32: 144-149.

Malhi, S.S., Grant, C.A., Johnston, A.M., Gill, K.S., 2001. Nitrogen fertilization management for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: a review. **Soil and Tillage Research**. 60, 101–122.

Mandal, U.K., G. Singh, U. S., Victor. K.L. Sharma. 2003. Green manuring: its effect on soil properties and crop growth under rice-wheat cropping system. **European Journal of Agronomy**. 19, 225-237.

Manoliadis, O.G. 2001. Analysis of Irrigation Systems Using Sustainability-Related Criteria. **Journal of Environmental Quality**. (30):1150-1153. SAS INSTITUTE: *The SAS System for Windows*, ver. 6.12. SAS, Institute Inc., Cary, NC, 1996.

McMaster G. S., D.B. Palic y G.H. Dunn. 2002. Soil management alters seedling emergence and subsequent autumn growth and yield in dryland winter wheat–fallow systems in the central Great Plains on a clay loam soil, **Soil and tillage research**. (65), pp. 193–206.

Miller D.E. y J. S. Aarstad. 1983. Residue management to reduce furrow erosion. **Journal of soil and water conservation**. 38: 366-370

Milthorpe F. L. 1959. Studies on the expansion of the leaf surface. 1. The influence of temperature. **Journal Experimental Botany**. 10: 233-249.

MMA. 2008. Agricultura de conservación. (Ver. http://www.mma.es/porta1/secciones/biodiversidad/desertificacion/inventario_tecnologias_lucha_contra_desertificacion/pdf/69_Agriculturadeconservacion.pdf)

Moreno, F., F. Pelegrín, J. E. Fernández y J. M. Murillo. 1997. Soil physical properties, water depletion and crop development under traditional and conservation tillage in southern Spain. **Soil & Tillage Research**. 41: 25-42

Nielsen, D.C., Unger, P., Miller, P.R., 2005. Efficient water use in dryland cropping systems in the Great Plains. **Agronomy Journal**. 97, 364–372.

Papendic, R.I., Lindstro, M.J., and Cochran, V.L. 1973. Soil Mulch Effects on Seedbed Temperature and Water During Fallow in Eastern Washington. **Soil Science Society of American Journals**. 37:307-314.

Raimbault, B. A. y Vyn, T. J. 1991. Crop-rotation and tillage effect on corn growth and soil structural stability. **Agronomy Journal**. 83, 979-985. McMaster, G. S., D. B. Palic, G.

Riley, H. C. F. 1998. Soil mineral-N and N-fertilizer requirements of spring cereals in two long-term tillage trials on loam soil in southeast Norway. **Soil and Tillage Research**. 48, 265-274

Sánchez, M., 2009. Los Sistemas de Irrigación en México. Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. (Ver. http://red-tematica-conacyt.blogspot.com/2009_06_01_archive.html)

Sayre, K.D y P.R. Hobbs. 2004. The raised-bed system of cultivation for irrigated production conditions. In: Sustainable Agriculture and the Rice-Wheat System. R. Lal, P. Hobbs, N. Uphoff and D.O. Hansen (eds). **Ohio State University**. Columbus, Ohio, USA. Chapter 20: 337-355.

Scotford, I. M., P.C.H, Miller. 2004. Combination of spectral reflectance and ultrasonic sensing to monitor the growth of winter wheat. **Biosystems Engineering**. 87, 27-38.

Shaxson, F. y Barber, R. 2005. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo. **BOLETÍN DE SUELOS DE LA FAO 79**.

SICA. (s.f.). Labranza Cero. **Servicio de información agropecuaria del ministerio de agricultura y ganadería del ecuador** (Ver. http://www.sica.gov.ec/agronegocios/biblioteca/ing%20rizzo/Varios/labranza_cero.htm)

Silgram, M., Shepherd, M.A., 1999. The effects of cultivation on soil nitrogen mineralization. **Advances in Agronomy**. 65, 267–311.

Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., and Doran, J.W. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. **Soil Science Society of American Journals**. 62:1367-1377.

Six, J., Elliott, E.T., and Paustian, K. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**. 32:2099-2103.

Strudley, M.W., Green, T.R., Ascough II, J.C., 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. **Soil and Tillage Research**. 99, 4–48.

Tennakoon, B. y N.R. Hulugalle. 2006. Impact of crop rotation and minimum tillage on water use efficiency of irrigated cotton in a Vertisol. **Irrigation Science**. 25: 45–52.

Uribe, H. y J. L. Rouanet, 2002. Efecto de tres sistemas de labranza sobre el nivel de humedad en el perfil del suelo. **Agricultura técnica**. 62: 555-564.

Verhulst, N., B. Govaerts, E. Verachtert, A. Castellanos-Navarrete, M. Mezzalama, P.C. Wall, A. Chocobar, J. Deckers, K. D. Sayre. 2009a. Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems?. **Advances in soil science**. In press.

Verhulst, N. B. Govaerts, F. Kienle, L. Tijerina-Chavez, J. Deckers, D. Raes, K. D. Sayre. 2009b. The effect of tillage, crop residue management and nitrogen fertilization on wheat crop performance in an irrigated bed planting system in northwestern of Mexico. **Proceedings of the International Soil Tillage Research Organisation 18th Triennial Conference**, Izmir, Turkey, June 15-19. ISBN: 978-975F-483-823-7.

Vyn, T. J., Raimbault, B. A. 1993. Long term effect of 5 tillage systems on corn response and soil-structure. **Agronomy Journal**. 96, 502-509.

White, R.E., 2005. Principles and Practice of Soil Science: The Soil As a Natural Resource 4^o ed., Blackwell Publishing.